

Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel von Gips

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaften
(Dr. rer. pol.)**

**der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg**

vorgelegt im Oktober 2000 von
Dipl.-Wirtschaftsingenieur Markus Arendt
aus Karlsruhe

1. EINLEITUNG	1
1.1 PROBLEMSTELLUNG.....	1
1.2 ZIELSETZUNG UND AUFBAU DER ARBEIT	5
2. ANSÄTZE ZUR STEUERUNG VON STOFFSTRÖMEN.....	8
2.1 GRUNDLAGEN DER STOFFSTROMSTEUERUNG	8
2.2 LEITBILDER DES STOFFSTROMMANAGEMENTS.....	11
2.2.1 Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“	13
2.2.2 Leitbild der Kreislaufwirtschaft aus Sicht des <i>Bio- und Mineralzyklus</i>	17
2.2.3 Das Faktor 10-Modell	18
2.2.4 Gestaltung der Stoffwirtschaft im Einklang mit <i>regionalen geogenen Verhältnissen</i>	19
2.2.5 Leitbilder der Abfallwirtschaft.....	20
2.2.6 Reduktionswirtschaft.....	22
2.3 BEDINGUNGSRAHMEN FÜR STOFFSTROMSTEUERUNG.....	23
2.3.1 Physikalische Rahmenbedingungen	23
2.3.2 Technologische Rahmenbedingungen	26
2.3.3 Einzel- und volkswirtschaftliche Rahmenbedingungen.....	29
2.3.4 Sozio-kulturelle Rahmenbedingungen.....	30
2.4 INSTRUMENTE FÜR DIE STOFFSTROMGESTALTUNG.....	32
2.4.1 Ordnungsrechtliche Instrumente	32
2.4.2 Ökonomische Instrumente	34
2.4.3 Informatorische und freiwillige Instrumente	36
2.5 ZUSAMMENFASSUNG UND EXTRAKTION DER THEORETISCHEN ANSÄTZE IM HINBLICK AUF DEN UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND.....	38
3. STOFFSTRÖME IM BAUBEREICH	40
3.1 GLIEDERUNG UND BEGRIFFE IM BAUBEREICH	41
3.2 DAS MENGENPROBLEM	43
3.3 DIE BAUWIRTSCHAFT IN DER ABFALLWIRTSCHAFT	44
3.4 DAS ZEITPROBLEM.....	51
3.5 DAS PROBLEM DER VERANTWORTLICHKEITEN	52
3.6 RECHTLICHE GRUNDLAGEN.....	53
3.7 ZUSAMMENFASSUNG.....	58

4. MODELL EINER QUALITATIV-QUANTITATIVEN BESCHREIBUNG VON STOFFSTRÖMEN UND STOFFLAGERN.....	59
4.1 DIE DISPERSION DES MATERIALS	60
4.1.1 Quantitative Ansätze zur Beschreibung der Dispersion.....	62
4.1.1.1 Die Entropie als Maß zur Beschreibung der Unordnung	61
4.1.1.2 Der Durchmischungsgrad nach Behrens	66
4.1.2 Beschreibungsraster für die Dispersion von Gips	68
4.1.2.1 Technologische Kriterien.....	70
4.1.2.1.1 Verbindungsstruktur	70
4.1.2.1.2 Monostruktur	72
4.1.2.1.3 Recyclingfähigkeit.....	74
4.1.2.2 Ökologische Kriterien.....	78
4.1.2.2.1 Deponierfähigkeit.....	79
4.1.2.2.2 Ressourcenschonung	80
4.1.2.2.3 Schadstoffgehalt.....	82
4.1.2.3 Ökonomische Kriterien.....	83
4.1.2.3.1 Separierungskosten.....	85
4.1.2.3.2 Logistikkosten.....	87
4.1.2.3.3 Existierender Sekundärrohstoffmarkt	88
4.1.2.4 Individuell-wahrnehmungsbezogene Kriterien.....	90
4.1.2.4.1 Akzeptanz.....	91
4.1.2.4.2 Förderung des Umweltbewusstseins	92
4.2 DIE VERWEILZEIT.....	93
4.2.1 Die Lebensdauer als Determinante für die Verweilzeit.....	94
4.2.1.1 Grundsätzliche Notationen von Lebensdauern.....	94
4.2.1.2 Lebensdauern im Baubereich	98
4.2.2 Die Darstellung der Verweilzeit als dynamischer Prozess	103
4.2.2.1 Überlegungen zur Entwicklung des Bedarfs.....	103
4.2.2.2 Die Kohortenanalyse	105
4.3 DIE GRÖÖE DES BAUSTOFFLAGERS	109
4.3.1 Das Top-Down-Verfahren zur Quantifizierung von Stoffströmen und -lagern im Bauwesen.....	110
4.3.2 Das Bottom-Up-Verfahren zur Quantifizierung von Stoffströmen und -lagern im Bauwesen.....	113
4.3.3 Erweiterung der Mengenbetrachtungen um eine systemtechnische Analyse.....	116
4.4 ZUSAMMENFASSUNG DER MODELLBILDUNG.....	118

5. ANWENDUNG DES MODELLS AUF DEN STOFFSTROM GIPS .	120
5.1 DER BAUSTOFF GIPS	120
5.1.1 <i>Vorkommen von Gips</i>	120
5.1.1.1 Natürlicher Gips	120
5.1.1.2 Technischer Gips	123
5.1.2 <i>Verwendung von Gips</i>	125
5.1.3 <i>Entsorgung von Gips</i>	130
5.2 ENTWICKLUNG DER MODELLPARAMETER FÜR GIPS	134
5.2.1 <i>Dispersionsgrade von Gipsprodukten</i>	134
5.2.2 <i>Verweilzeit von Gipsprodukten</i>	143
5.2.3 <i>Die kohortenanalytische Darstellung des Bestands an Gipsprodukten</i>	146
5.2.4 <i>Die Größe des Gipslagers und der Gipsströme</i>	150
5.2.5 <i>Exkurs: Schwefelbilanz in Oberösterreich</i>	157
5.3 DIE DARSTELLUNG DES GIPSLAGERS IM BAUWESEN NACH DEN KRITERIEN DISPERSION UND VERWEILZEIT	167
5.4 ZUSAMMENFASSUNG.....	171
6. ERKENNTNISSE AUS DEM BESCHREIBUNGSMODELL FÜR DIE GESTALTUNG DES STOFFSTROMS GIPS.....	173
6.1 QUANTITATIVE EINFLUSSFAKTOREN AUF DER INPUTSEITE.....	175
6.1.1 <i>Veränderung des Primärrohstoffangebots</i>	175
6.1.1.1 Veränderung im Angebot von REA-Gips	176
6.1.1.2 Veränderung im Naturgipsangebot	180
6.1.2 <i>Veränderung der Nachfrage</i>	184
6.1.3 <i>Verbringung auf Monodeponien</i>	190
6.2 QUALITATIVE VERÄNDERUNG DURCH RECYCLINGGERECHTE KONSTRUKTION VON GIPSPRODUKTEN	194
6.3 EINFLUSSFAKTOREN AUF DER OUTPUTSEITE	198
6.3.1 <i>Verwertung von Produktionsabfällen</i>	199
6.3.2 <i>Recycling von Gipsplatten</i>	200
6.3.3 <i>Recycling von Baugipsen</i>	203
6.3.4 <i>Neue Recyclingverfahren für Gipsprodukte</i>	206
6.3.4.1 Das Müller-Kühne-Verfahren	206
6.3.4.2 Mikrowellen zum Abtrag von Beschichtungen im Bauwesen	212
6.4 ZUSAMMENFASSUNG.....	213
7. THESENARTIGE ZUSAMMENFASSUNG	215

LITERATURVERZEICHNIS	219
GLOSSAR	242
ANHANG	246
A1 MAXIMAL ERLAUBTE SCHADSTOFFKONZENTRATIONEN IM ELUAT GEMÄß GESETZLICHEN REGELUNGEN.....	247
A2 BERECHNUNG DER STOFFSTRÖME GIPS UND SCHWEFEL IN OBER- ÖSTERREICH.....	248
A3A SZENARIO 1: LINEARER BESTANDSZUWACHS AUF BASIS DER PRO- DUKTION 1997	255
A3B SZENARIO 2: SUBSTITUTION DURCH ANDERE BAUSTOFFE, LEICH- TERE BAUWEISE SOWIE UMSTIEG AUF GIPSPRODUKTE MIT GERIN- GEREN DISPERSIONSGRADEN	265
A3C SZENARIO 3: MENGENBESCHRÄNKUNG DER PRODUKTION VON GIPSPRODUKTEN AB 2010 AUF 5,3 MIO. T/A (PRODUKTIONSVOLU- MEN VON 1991)	274
A4 MATHEMATISCHE FORMULIERUNG DES WAREHOUSE-LOCATION- PROBLEMS.....	283

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit	7
Abbildung 2.1: Zuordnung von Leitbildern des Stoffstrommanagements	23
Abbildung 2.2: Streckungsfaktor einer Ressource in Abhängigkeit des Rezykliefaktors α	26
Abbildung 2.3: Die Verteilung der Aufgaben im Stoffstrommanagement.....	29
Abbildung 3.1: Prognose der Nachfrage nach mineralischen Baustoffen in Deutschland 1995-2040	44
Abbildung 3.2: Güterfluss im Bauwesen Österreichs, Angaben in Kilogramm pro Einwohner und Jahr.....	46
Abbildung 3.3: Typische Lebensdauern von Produkten	51
Abbildung 4.1: Einflussfaktoren auf Zu- und Abfluss im Stofflager Bauwesen	94
Abbildung 4.2: Verlauf der kumulierten Ausfallwahrscheinlichkeit für mehrere Weibull-Verteilungen und eine Normalverteilung mit Mittelwert 30	98
Abbildung 4.3: Ansätze zur Bestimmung von Stoffströmen und Stofflagern im Bauwesen.....	110
Abbildung 4.4: Einbettung von Baurestmassen in die Anthroposphäre und Verknüpfung mit der Umwelt.....	117
Abbildung 5.1: Produktstammbaum Gipsprodukte	127
Abbildung 5.2: Mengenstruktur der Gipsherkunft und -verwendung in Deutschland 1991 ..	129
Abbildung 5.3: Stoffstrom Gips in und aus dem Bausubstanz-Puffer	133
Abbildung 5.4: Mögliche zukünftige Entwicklung von Gipsangebot und Gipsnachfrage	134
Abbildung 5.5: Verteilung der Gipsprodukte im Stofflager 1997 bezogen auf durchschnittli- che Lebensdauer und Dispersionsgrad.....	145
Abbildung 5.6: Gipsfluss im Bauwesen Oberösterreichs.....	155
Abbildung 5.7: Schwefelbilanz im Bauwesen Oberösterreichs	161
Abbildung 5.8: Schwefelfluss in den Baurestmassen im Vergleich zum Schwefelfluss in der sonstigen Abfallwirtschaft (nur feste Abfälle)	163
Abbildung 5.9: Schwefelfluss in den Baurestmassen im Vergleich zum Schwefelfluss in der Bauwirtschaft.....	164
Abbildung 5.10: Schwefelfluss in den Baurestmassen im Vergleich zum Schwefelfluss in Oberösterreich.....	166
Abbildung 5.11: In Verkehr gebrachte Gipsmengen in Deutschland zwischen 1950 und 1997, aufgeteilt nach Dispersionsgrad.....	169
Abbildung 5.12: Prognostizierte jährliche Abfallströme an Gipsprodukten 1970 - 2034.....	171
Abbildung 6.1: Einfluss- und Gestaltungsmöglichkeiten im Stoffstrom Bauwesen.....	174
Abbildung 6.2: Prognose des REA-Gips-Anfalls in Deutschland bis 2030.....	178

Abbildung 6.3: Veränderung der Zusammensetzung des Abfallstroms bei recyclinggerechter Produktgestaltung	196
Abbildung 6.4: Prinzip des Müller-Kühne-Verfahrens	207
Abbildung 6.5: Mögliche Anlagenstandorte für das Müller-Kühne-Verfahren	211

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Bedingungen für ein effektives Stoffstrommanagement.....	11
Tabelle 2.2:	Übersicht über Leitbilder des Stoffstrommanagements	12
Tabelle 2.3:	Vor- und Nachteile ordnungsrechtlicher Instrumente	33
Tabelle 2.4:	Vor- und Nachteile ökonomischer Instrumente	36
Tabelle 2.5:	Vor- und Nachteile informatorischer Instrumente	38
Tabelle 3.1:	Gliederung des Bauwesens nach Bausparten.....	41
Tabelle 3.2:	Gliederung des Baugewerbes	42
Tabelle 3.3:	Aus Zielen der Abfallwirtschaft abgeleitete Kriterien zur Beurteilung von Maßnahmen der Gestaltung von Bauabfallströmen	50
Tabelle 4.1:	Einteilung der Stoffe	61
Tabelle 4.2:	Ausprägung der Verbindungsstruktur im Hinblick auf den Dispersionsgrad....	72
Tabelle 4.3:	Ausprägung der Monostruktur im Hinblick auf den Dispersionsgrad	74
Tabelle 4.4:	Ausprägung der Recyclingeignung von Bauprodukten	77
Tabelle 4.5:	Herleitung von Bewertungskriterien aus Leitbildern des Stoffstrommanagements	78
Tabelle 4.6:	Ausprägung der Deponierfähigkeit im Hinblick auf den Dispersionsgrad	80
Tabelle 4.7:	Ausprägung der Ressourcenschonung im Hinblick auf den Dispersionsgrad	81
Tabelle 4.8:	Ausprägung des Schadstoffgehalts im Hinblick auf den Dispersionsgrad.....	83
Tabelle 4.9:	Ausprägung der Separierungskosten im Hinblick auf den Dispersionsgrad....	86
Tabelle 4.10:	Ausprägung der Logistikkosten im Hinblick auf den Dispersionsgrad	88
Tabelle 4.11:	Ausprägung des existierenden Sekundärrohstoffmarktes im Hinblick auf den Dispersionsgrad.....	89
Tabelle 4.12:	Ausprägung der Akzeptanz im Hinblick auf den Dispersionsgrad	92
Tabelle 4.13:	Lebensdauer ausgewählter Bauteile.....	102
Tabelle 4.14:	Kohortentabelle mit Darstellung von Zeilen- und Spaltenmitteln	107
Tabelle 4.15:	Typisierungsmerkmale des Gebäudebestands	114
Tabelle 5.1:	Zusammensetzung des Trinkwassers im Raum Franken und im Ruhrgebiet (Angaben in mg/kg Wasser).....	122
Tabelle 5.2:	Typische Spurenelementkonzentrationen von Naturgips und REA-Gips	124
Tabelle 5.3:	Phasen des Systems $\text{CaSO}_4 / \text{H}_2\text{O}$	126
Tabelle 5.4:	Charakteristika von wichtigen Gipsprodukten.....	136
Tabelle 5.5:	Übersicht über die Ausprägungsgrade von Gipsprodukten und daraus resultie- rende produktspezifische Dispersionsgrade.....	141
Tabelle 5.6:	Mittlere Verweilzeiten T und Ausfallverhalten a für Gipsprodukte.....	144

Tabelle 5.7:	Kohortenanalytische Darstellung des Bestands an Gipskartonplatten 1970-2035; Weibull-Verteilung $T=40$, $a = 2$ linearer Bestandszuwachs auf Basis 1997 = 1,56 Mio. t/a.....	148
Tabelle 5.8:	Schwefelgehalte in Bauprodukten in mg/kg.....	158
Tabelle 5.9:	Parameter für die Darstellung der Stoffströme und Stofflager von Gips	168
Tabelle 6.1:	Angebot und Verbrauch von Gips in Deutschland, Angaben in 1000 t.....	175
Tabelle 6.2:	Reichweite der deutschen Naturgipsvorkommen in Jahren in Abhängigkeit von Abbaugrad und konstanter jährlicher Gewinnungsmenge; Basis Gipsreserven = 160 Mio. t	181
Tabelle 6.3:	Reichweite der deutschen Naturgipsvorkommen in Jahren in Abhängigkeit von Abbaugrad und prozentualer jährlicher Gewinnungsmenge	181
Tabelle 6.4:	Angebots-/Verbrauchsstruktur bei jährlicher Fördermenge von 3 Mio. Naturgips	182
Tabelle 6.5:	Angebots-/Verbrauchsstruktur bei jährlicher Fördermenge von 1,5 % der vorhandenen Naturgipsreserven	183
Tabelle 6.6:	Prognose des Gipsbedarfs 2000-2050 nach rechnerischen Kennwerten	187
Tabelle 6.7:	Prognose des Gipsbedarfs 2000-2050 bei Substitution durch andere Stoffe	189
Tabelle 6.8:	Verlauf von Angebot und Nachfrage nach Gipsprodukten bei einer freiwilligen Selbstbeschränkung auf 5,3 Mio. t ab 2010 (Angaben in t)	193
Tabelle 6.9:	Vergleich von Aufbereitungskosten für Gipsplatten.....	201
Tabelle 6.10:	Vergleich von Aufbereitungskosten für Baugipse.....	205

Zusammenfassung:

Im Zuge der Diskussion um eine ökologisch und ökonomisch verträgliche Gestaltung von Stoffströmen richtet sich der Fokus in den letzten Jahren zunehmend auf den Bausektor. Dies ist im wesentlichen auf drei spezifische Einflussfaktoren zurückzuführen: die mengenmäßig überragende Bedeutung des Bausektors, die sehr heterogene Struktur der Akteure im Stoffstrom und nicht zuletzt die lange Verweilzeit von erstellten Produkten im Puffer Bauwesen, die erst in der nächsten oder übernächsten Generation einen Abfallstrom induziert. Neben der expliziten Betrachtung einer Gestaltung der Entsorgungsströme untersucht Stoffstrommanagement auch die Versorgungsseite und beantwortet die Frage der Ressourcenverfügbarkeit für kommende Generationen. Die möglichst effiziente Kopplung von Versorgung, Konsum und Entsorgung sowie die Planung der Austauschbeziehungen zwischen diesen drei Sektoren und zwischen Technosphäre und Ökosphäre ist dabei im Mittelpunkt.

Ziel der Arbeit ist es, den Bestand des Stofflagers im Bauwesen im Hinblick auf seine Eigenschaft als zukünftigen Input für die Reduktionswirtschaft und damit als Ressource für die Bauwirtschaft von morgen zu beschreiben. Hierzu wird der Begriff des Dispersionsgrads eingeführt, der mit Hilfe qualitativer Parameter Art und Ausmaß der Verteilung eines Stoffes in einem Produkt unter dem Gesichtspunkt einer effizienten Kreislaufführung beschreibt. Aggregiert man die Dispersionsgrade eines Stoffs über alle Produkte, in denen dieser Stoff vorkommt, ergibt sich die qualitative Zusammensetzung des Stofflagers für diesen Stoff und damit eine Planungsgröße für die Reduktionswirtschaft. Für eine Dynamisierung des Modells wird die durchschnittliche Lebensdauer eines Produkts sowie deren Streuung geschätzt. Zur Schätzung der Mengen eines Stoffes wird eine systemische Darstellung herangezogen, so dass die bestehende Datenunsicherheit sowohl durch Top-Down- und Bottom-Up-Ermittlungen als auch durch einen Systemvergleich mit anderen Stoffströmen minimiert wird. Die Modellierung des Lagers als Durchflussreaktor aus qualitativ-zeitlich unterschiedlichen Elementen erlaubt die Prognose über Mengen, Qualitäten und Zeitpunkte zukünftiger Abfälle.

Die Anwendung des Modells erfolgt am Beispiel von Gips. Obwohl von Gips keine unmittelbaren Gefahren bei Gebäudenutzung und Entsorgung ausgehen, sind für Gips einige wenig beachtete zukünftige Trends kennzeichnend. So steigt, bedingt durch synthetische Gipsquellen (Rauchgasentschwefelung), die Verwendung von Gips im Baubereich seit etwa 1985 stark an, es muss jedoch infrage gestellt werden, inwieweit dieser Bedarf auch in Zukunft über das Jahr 2030 hinaus gedeckt werden kann. Ferner müssen Konzepte für den Umgang mit dem bereits in näherer Zukunft zu erwartenden stark anschwellenden Abfallstrom formuliert werden, wenn man berücksichtigt, dass Gips die Wiederverwendbarkeit anderer Baumaterialien und das Verhalten von Bauschutt auf Deponien beeinträchtigt.

Die Darstellungsform erlaubt die Entwicklung möglicher Szenarien: Welche Auswirkungen besitzt ein Verzicht auf die Kohleverbrennung? Welche Menge an kreislaufgeführtem Gips ist für die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit erforderlich? Welche Anforderungen werden an die recyclinggerechte Konstruktion neuer Gipsprodukte mit niedrigeren Dispersionsgraden und längeren Lebensdauern gestellt? Welche Abfallwege sollen die Gipsmaterialien gehen? Welche technischen, logistischen und informatorischen Voraussetzungen müssen gegeben sein, um eine maximale Kreislaufführung zu ermöglichen?

Die qualitativ-zeitliche Modellierung von anthropogenen Lagerbeständen lässt sich grundsätzlich auf alle persistenten Materialien oder Stoffe anwenden, der Aufwand steigt jedoch mit der Anzahl der Produkte, in denen der Stoff vorkommt.

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Beitrag zur Einbettung der aktuellen Diskussion über den Baubereich als einem der bedeutendsten volkswirtschaftlichen Bereiche in die Debatte über Stoffstrommanagement und die Etablierung einer Reduktionswirtschaft. Sie thematisiert beide Bereiche und entwickelt ein Modell, mit dessen Hilfe die Phänomenologie des Baubereichs den Anforderungen an das Stoffstrommanagement zugänglich gemacht wird. Am Beispiel von Gips werden schließlich anhand des Modells Maßnahmen für das Stoffstrommanagement abgeleitet und gleichzeitig Planungsgrundlagen für die Reduktionswirtschaft geschaffen.

(1) Die **Kreislaufführung** von Stoffen hat in den letzten 20-30 Jahren im Zusammenhang mit der langfristigen Schonung der Lebens- und Produktionsbedingungen erheblich an Bedeutung gewonnen. Den Anfang machte die Betrachtung des Umgangs mit Abfällen: sich verknappende Primärressourcen, die rasante Zunahme der zu entsorgenden Mengen, die Verknappung des Deponieraums und die zunehmenden Erkenntnisse über die akute und die langfristige Gefährlichkeit von Abfällen fanden Eingang in rechtliche und ökonomische Randbedingungen, dass es zu raschen technologischen Innovationen in der Abfalltechnik kam.

Etwa Anfang der 90er Jahre wurde diese Betrachtung durch die **Kreislaufwirtschaft** erweitert. Hintergrund der Kreislaufwirtschaft ist die Verknüpfung der Abfallwirtschaft mit der Produktionswirtschaft auf stofflicher Ebene (Abkehr vom Prinzip des Durchflussreaktors) und die Integration ökonomischer Sachverhalte in die Entscheidungen im Wirtschaftsprozess¹. Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, die Stoffe und Produkte am Ende ihrer Lebensdauer möglichst lange und so weit wie möglich ohne Qualitätsverlust im Wirtschaftskreislauf zu halten. Damit soll es im Sinne des Vorsorgeprinzips möglich sein, zukünftige Probleme bereits bei ihrer Entstehung zu vermeiden oder mit einer hinreichenden Planungszeit vorhersagbaren Problemen rechtzeitig zu begegnen.

Die **Reduktionswirtschaft** versteht sich Bestandteil der Kreislaufwirtschaft durch die gezielte Betrachtung der Entsorgung². Die Reduktion ist zwar von der Produktion abhängig, gleiches gilt in einer Kreislaufwirtschaft aber auch für die Abhängigkeit der Produktion von der Reduktion. Sie steht somit gleichberechtigt neben Produktion und Konsumtion, die bereits seit langer Zeit von Interesse in der ökonomischen Theorie waren. Die Reduktionswirtschaft ist das Komplement zur Produktionswirtschaft, indem sie genauso mit Input- und Outputressourcen plant, Transformationsprozesse nach ökonomischen Maximierungskriterien durchführt und hierzu Hilfsstoffe und Kapazitäten einsetzt³. Wesentliche Planungsgrößen für die Reduktionswirtschaft sind die Entwicklung der Mengen sowie die Zusammensetzung der Abfälle als Inputressource. Die vorliegende Arbeit soll hierzu einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenplanung in der Reduktionswirtschaft des Baubereichs für die kommenden Jahre leisten.

¹ Solche Wertschätzungen gab es auch in früherer Zeit. So war Gold immer ein knappes Gut, und dementsprechend wurden in der Abfallwirtschaft große Anstrengungen unternommen, um Gold zu rezyklieren. Etwa 99 % des jemals geförderten Goldes befinden sich noch im Umlauf.

² Als „Begründer“ der reduktionswirtschaftlichen Theorie im deutschsprachigen Raum können Liesegang und Dyckhoff angesehen werden. Profunde Darstellungen der Reduktionswirtschaft liefern Souren (1996) sowie Sterr (1999).

Während die Reduktionswirtschaft die Abbildung der Kreislaufwirtschaft in die ökonomische Theorie widerspiegelt, versucht das **Stoffstrommanagement**, ganzheitliche Strategien zu entwerfen, wie sowohl intragenerational als auch intergenerational die rapide wachsenden Stoffströme in der Technosphäre beherrschbar gemacht werden können⁴. Im Zentrum des Interesses steht die Frage, welche ordnungsrechtlichen, ökonomischen oder informativ-schen Maßnahmen ergriffen werden müssen, um angesichts einer Vielzahl von Zielsetzungen Stoffströme auch über einen längeren Zeitraum hinweg steuern zu können. Die Arbeit soll hierzu Impulse geben, indem nachhaltige Zielkriterien und Maßnahmen für den Baubereich und speziell für Gips abgeleitet werden, um somit der Verantwortung des Stoffstrommanagements, bereits heute für morgen zu denken, gerecht zu werden.

(2) Der **Baubereich** ist derjenige volkswirtschaftliche Sektor, dem rund 50 % aller anthropogen induzierten Stoffströme zuzurechnen sind. So werden in Deutschland jährlich etwa 700 Millionen Tonnen mineralische Naturrohstoffe abgebaut, von denen etwa 250-350 Millionen Tonnen zur Herstellung von Baustoffen verwendet werden. Demgegenüber fallen etwa 30-60 Millionen Tonnen an Bauabfällen, von denen etwa 20-30 % verwertet werden⁵. Es fehlen jedoch überwiegend Konzepte für eine geschlossene Kreislaufführung von Materialien. Zwar steigt die Menge an wiederaufbereiteten Materialien in letzter Zeit stark an, nicht zuletzt durch die zunächst in der Baurestabfallverordnung von 1992 genannten und in der Selbstverpflichtung der Bauwirtschaft von 1996 nochmals bekräftigten Wiederverwertungsziele. Dennoch konnten die optimistischen Verwertungsvorgaben (60 % für Bauschutt, 40 % für Baustellenabfälle im Jahr 1995) bei weitem nicht eingehalten werden, obwohl viele der erzeugten Sekundärrohstoffe für niederwertige Aufgaben eingesetzt (etwa Betonabbruch aus dem Hochbau als Deckschichten im Straßenbau) und nicht zu volkswirtschaftlich ähnlich nutzenstiftenden Gütern verarbeitet wurden (sogenanntes Downcycling). Verwertungsquoten und Selbstverpflichtungen allein scheinen also kein hinreichendes Mittel sind, um die Kreislaufwirtschaft im gewünschten Umfang zu fördern.

Dagegen zeichnet sich für einige Baustoffe eine Rohstoffverknappung ab⁶. Dies ist im wesentlichen auf eine restriktivere Vergabe von Abbaurechten zurückzuführen, darüber hinaus wird die Gewinnung durch regionale Unterschiede in Qualität, Menge und Verfügbarkeit aufwändiger. Hinzu kommen Umweltschutzaspekte beim Abbau, wie Staub, Lärm, Grundwassergefährdungen, Bodenkontaminationen und Landschaftseingriffe. Auch die unbedenkliche Entsorgung von anfallendem Bauschutt und Bodenaushub auf Bauschuttdeponien, die nicht den hohen Ablagerungsanforderungen von Hausmülldeponien genügen müssen, scheint nicht grundsätzlich für alle Zeiten gewährleistet zu sein. Begründet wird dies durch die zunehmende Chemismus von abgelagerten Materialien und den hiervon ausgehenden Gefahren, insbesondere für das Grundwasser. Dies ist eine Folge der zunehmenden Ablagerung von nach 1950 erstellten Bauten und den in ihnen enthaltenen Chemikalien (etwa Zuschlagstoffe im Beton), des Zwangs zur Deponierung von Verbundmaterialien mit ihren zum Teil unbekannten chemischen Eigenschaften und Wechselwirkungen, der zunehmenden Zahl

³ Zu Unterschieden zwischen Produktions- und Reduktionsbetrieben vgl. Souren (1996)

⁴ Einen wesentlichen Beitrag zum Konzept des Stoffstrommanagements leistete die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages (1993, 1998). Vgl. hierzu Kapitel 2

⁵ Zu Größenordnungen und Begriffsdefinitionen vgl. Kapitel 3.1 sowie Kapitel 3.2

⁶ Erste Tendenzen zu einer Rohstoffverknappung sind bei Natursteinen sowie bei Sand und Kies (abzulesen an überproportionalen Steigerungen der Erzeugerpreise um 21,1 % zwischen 1985 und 1992) und folglich bei Betonerzeugnissen (Preissteigerung um 26 % zwischen 1985 und 1992) und Transportbeton feststellbar (Preisanstieg um 24 % zwischen 1985 und 1992).

von Altlasten sowie der zunehmenden Akkumulation persistenter Schadstoffe. Im übrigen ist von einer generellen Deponieraumverknappung auszugehen, die auch für Bauschutt- und Bodenaushubdeponien gelten wird.

Die Phänomenologie des Baubereichs ist im wesentlichen von drei Eigenheiten gekennzeichnet, die für die Planung in der Reduktionswirtschaft von überragender Bedeutung sind:

- Die **Massen** im Baubereich übersteigen die Massen anderer volkswirtschaftlicher Sektoren beträchtlich. Zudem ist seit etwa 50 Jahren zu beobachten, dass der Stoffumsatz im Baubereich weit von einem Fließgleichgewicht entfernt ist. Der Input übersteigt den Output um den Faktor 5-10, was zum Aufbau eines riesigen Lagers in der Technosphäre führt. In wenigen Jahren ist jedoch von einer Angleichung von Input und Output auszugehen, so dass die abzureißenden Mengen um den Faktor 3-10 steigen dürften⁷.
- Die **Verweildauer** der Stoffe während der Konsumtion im Baubereich übersteigt die sonst übliche Verweildauer erheblich, häufig über die Lebensdauer eines Menschen. Eine Kennzeichnung der Materialien erfolgt in der Regel nicht. Die Nutzungsdauer der Stoffe ist großen Schwankungen unterworfen (z.B. in Abhängigkeit des Einsatzortes).
- Die Zusammensetzung der Stoffe spielt eine überragende Rolle im Reduktionsprozess. Bauabfälle sind wesentlich dadurch gekennzeichnet, dass wenige Störstoffe große Mengen anderen Materials verunreinigen und deren Kreislaufführung erschweren bzw. unmöglich machen. Die **Dispersion** vieler Stoffe als Maß ihrer Durchmischung mit anderen Stoffen ist häufig nicht-reversibel und wird durch Prozesse im Zuge der Reduktion noch vergrößert.

Die Dispersion von Stoffen in einem Materialgemisch ist auch auf der Produktionsseite eine wichtige Eingangsgröße. So werden bei Rohstoffen aus der Natur häufig umfangreiche Veredelungsmaßnahmen durchgeführt, um eine gewünschte Stoffeigenschaft zu erreichen und damit Produkte einer gewünschten Qualität fertigen zu können. Bei den Naturrohstoffen kann in der Regel von einer weitgehend identischen Materialbeschaffenheit und chemischen Zusammensetzung ausgegangen werden, so dass die Aufwendungen planbar sind.

Diese Möglichkeit besteht in der Reduktionswirtschaft in dieser Form nicht. Das Ausgangsmaterial (also der Rohstoff) ist im Gegensatz zum Naturrohstoff in der Regel nicht homogen, sondern heterogen beschaffen. Um eine gewünschte Materialeigenschaft herzustellen, sind Reduktionsmaßnahmen unterschiedlichen Ausmaßes zu unterschiedlichen Zeitpunkten anzusetzen. Es ist eine zentrale Aufgabe der Reduktionswirtschaft, Umfang und optimalen Zeitpunkt dieser Maßnahmen planen zu können, da sonst die ökonomische Vorteilhaftigkeit rasch nicht mehr gegeben ist.

Mit Hilfe des **Dispersionsgrads** soll eine Beschreibung der Zusammensetzung der Inputresource Abfall für die Reduktionswirtschaft erfolgen. Damit soll die Reduktionswirtschaft in die Lage versetzt werden, die zu bestimmten Zeitpunkten anfallenden Massenströme qualitativ

⁷ So wurden in Deutschland 1993 rund 1,9 Mio. m² Wohn- und Nutzfläche in Wohngebäuden abgerissen (18.470 Wohnungen), während 36,1 Mio. m² Wohn- und Nutzfläche in Wohngebäuden erstellt wurden (404.413 Wohnungen). Geht man von einem Bestand von etwa 2,9 Mrd. m² aus (80 Millionen Einwohner, jedem stehen durchschnittlich etwa 36 m² zu), ergibt sich hieraus eine Abgangsrate von lediglich 0,095 % bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 100 Jahren. Mit anderen Worten: ein heutzutage erstelltes Wohngebäude würde bei gleichbleibender Abgangsrate erst in über 1000 Jahren abgerissen werden. Wenn sich die Abgangsrate in Zukunft irgendwann einmal an die durchschnittliche Nutzungsdauer von 100 Jahren anpasst (also auf 1 % steigt), steigen auch die abzureißenden Mengen um den Faktor 10 gegenüber. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt Spengler (1994, S. 114). Er errechnet eine Abgangsrate von 0,09% bei der Betrachtung der 1990 rückzubauenen Wohngebäude im Regierungsbezirk Karlsruhe.

zu beschreiben, so dass Umfang und Kosten von Reduktionsmaßnahmen geplant werden können.

(3) Die für den Baubereich kennzeichnenden Phänomene treffen auf **Gips** in teilweise noch stärkerem Maße zu. Gips ist ein seit vielen Jahrhunderten verwendeter Baustoff, der sich auf Grund einer Reihe günstiger Eigenschaften (Rohstoffvorkommen in der Nähe des Verbrauchsorts, leichte Verarbeitbarkeit, Feuerschutz, gutes Raumklima) großer Beliebtheit erfreut. Seit Mitte der 80er Jahre steigt die Verwendung von Gips als Baustoff jedoch stark an, da durch den Beginn der Rauchgasentschwefelung (REA) zunächst von steinkohlebeheizten Kraftwerken das Angebot von Gips schlagartig zugenommen hat. Es kam zu starken Bemühungen, den zusätzlichen Gips im Markt unterzubringen und Produkte abzusetzen. Dabei spielten insbesondere die günstigen Preise zunächst eine wichtige Rolle, da die Kraftwerksbetreiber daran interessiert waren, den aus ihrer Sicht als Abfall zu betrachtenden Gips möglichst günstig zu entsorgen. Verstärkt wurde diese Tendenz durch die deutsche Vereinigung, so dass statt früher 3 Mio. t heutzutage etwa 9 Mio. t Gips in den Baubereich eingebracht werden. Bei der Verwertung von REA-Gips im Baubereich handelt es sich jedoch lediglich um eine zeitlich befristete Deponierung des Stoffes in das technosphärische Zwischenlager, die mit dem Ende der Lebensdauer der aus REA-Gips erzeugten Produkte die gleiche Entsorgungsproblematik erzeugt und sie sogar noch verschärft, solange keine Konzepte für den Umgang mit den Baumaterialien nach Ende ihrer Lebensdauer existieren⁸.

Statt einer vermeintlichen Gipsschwemme liegt also jetzt eine neue Knappheit auf einem wesentlichen höheren Niveau vor, weswegen zur Deckung dieser Nachfrage wird neben dem REA-Gips weiterhin Naturgips in ähnlicher Größenordnung wie vor 1985 eingesetzt wird (ca. 3,5 – 4 Mio. t jährlich). Dies wirft aus Sicht des Stoffstrommanagements die Frage der Versorgungssicherheit mit Gips auch für zukünftige Generationen auf, da die bekannten Gipsreserven in Deutschland nach konservativen Schätzungen eine Reichweite von etwa 30-50 Jahren besitzen⁹. Auch die Erzeugung von technischem Gips könnte rückläufig sein, wenn aus Gründen des Klimaschutzes, einer zunehmenden Rohstoffverknappung bei Kohle, einem Umstieg auf schwefelärmere Importkohle oder bei Kalkknappheit¹⁰ die erzeugten REA-Gips-Mengen rückläufig sind.

Das Lager an Gips im Bauwesen wächst also zur Zeit überproportional an. Gipsprodukte machen zur Zeit etwa 3 % aller Baustoffe in den Hochbau aus, gegenüber etwa 1 % vor 1985. Abfallwirtschaftliche Konsequenzen dieses Handelns sind aber bereits erkennbar. Obwohl der Gipsanteil im Bauschutt zur Zeit auf etwa 1 % geschätzt wird, ist die Dispersion des Gipses in den Bauabfällen häufig bedenklich. So bereitet die Trennung des Gipses von anderen mineralischen Materialien im Bauschutt große Probleme, da dieser als unerwünschter Störstoff separiert werden muss. Nach Ablauf der Lebensdauern der gegenwärtig in den Baubereich eingebrachten Gipsprodukten in 30-50 Jahren wird der Gipsanteil auch im Bauschutt auf etwa 3 % zunehmen. So ist es aus reduktionswirtschaftlicher Sicht von Bedeutung, die Mengen, die Dispersion und die zeitliche Verteilung zukünftiger Gipsströme planen zu können. Aus Sicht des Stoffstrommanagements ist es erforderlich, bereits heute Maß-

⁸ Diese Kritik an einer baustofflichen Verwertung von Materialien teilt auch das Öko-Institut, da es in dieser Verwertungsform keinen Vorzug gegenüber der Abfallentsorgung nach dem Stand der Technik erkennen kann (Öko-Institut, 1993, S. 149)

⁹ BGR (1998). Import von Gips ist auf Grund des geringen spezifischen Materialwerts nur eingeschränkt wirtschaftlich

¹⁰ Soll als Nebenprodukt der Rauchgasentschwefelung Gips entstehen, muss das Kalkwäscheverfahren angewendet werden. Hierzu ist für jede Tonne REA-Gips 0,6 Tonne Kalk erforderlich.

nahmen zu entwickeln, wie der zukünftigen großen Gipsfracht im Abfallstrom technologisch und ökonomisch begegnet werden kann und wie diese Mengen genutzt werden können, um die Versorgung langfristig sicherzustellen.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur qualitativen und quantitativen Erfassung und Beschreibung von Stofflagern und Stoffströmen im Baubereich am Beispiel von Gips. Besonderes Augenmerk wird auf eine möglichst handhabbare und auch auf andere Stoffe übertragbare Beschreibung der qualitativen Zusammensetzung des Stofflagers der Gegenwart gelegt, da dieses Stofflager den Abfallstrom der Zukunft darstellt. Ziel ist es, das Vorkommen eines Stoffes im Stofflager so zu beschreiben, dass es gelingt, eine Bewertung in bezug auf die Eignung zur Kreislaufführung zu erhalten, hieraus unmittelbar Ansatzpunkte für gezielte Maßnahmen zur Optimierung des Stoffstroms im Sinne der Kreislaufwirtschaft abzuleiten und gleichzeitig eine langfristige Planungsgrundlage für die Reduktionswirtschaft zu schaffen. Dabei soll von der rein quantitativen Betrachtung einer stofflichen Durchmischung abstrahiert werden zugunsten eines multikriteriellen Ansatzes zur Beschreibung der Dispersion, das neben den technologischen auch die ökonomischen, sozialen und informatrischen Aspekte eines Stoffstrommanagements berücksichtigt.

Über die Stoffströme der Zukunft werden Szenarien angestellt, die sich einerseits aus Annahmen über die Dynamik der Abgänge bereits im Stofflager befindlicher Stoffe ableiten lassen, und andererseits aus Hypothesen über Angebot und Nachfrage nach Stoffen gebildet werden, die ins Stofflager einfließen. Diese Szenarien erstrecken sich über den Zeitraum der Lebensdauer von Gipsprodukten bis 2050 und bilden die Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen, wie bereits heute die Bewältigung des Stoffstroms von morgen aktiv geplant und der Stoffstrom von übermorgen aktiv beeinflusst werden kann.

Die auf Grund der Beschreibung des Stofflagers und der Stoffströme sowie der Szenarien abgeleiteten Empfehlungen sind eingebettet in ein übergreifendes Konzept des Stoffstrommanagement, das die Basis für ein gemeinsames Verständnis aller Akteure bildet und Neben- bzw. Rahmenbedingungen wie ökonomische Forderungen, technologische Möglichkeiten und rechtliche Steuerungsmöglichkeiten formuliert. Maßnahmen zur Steuerung von Materialströmen müssen z.B. geeignet sein, das bisher erreichte volkswirtschaftliche Nutzenniveau nach Möglichkeit nicht zu verschlechtern und gleichzeitig die Akteure zu eigenverantwortlichen, zielgerichteten Handlungen zu motivieren.

Vorgehensweise

Kapitel 2 widmet sich der Erläuterung des konzeptionellen Rahmens von Stoffstrommanagement und zeigt, dass es sich hierbei um einen sozialwissenschaftlichen Ansatz handelt, in dessen Mittelpunkt die Akteure stehen. Es werden verschiedene Leitbilder diskutiert, die sich zur Steuerung von Stoffströmen etabliert haben und als visionärer Orientierungsrahmen dienen. Die bei der Transformation dieser Vision in konkrete Aufgabenstellungen zu beachtenden Rahmenbedingungen, sowohl naturwissenschaftlicher als auch technischer und sozialwissenschaftlicher Natur, werden diskutiert, und es werden Vor- und Nachteile von Instrumenten bei der Umsetzung der Aufgabenstellungen erörtert. Eine Zusammenfassung der theoretischen Ansätze im Hinblick auf das Forschungsanliegen runden das Kapitel ab.

In **Kapitel 3** wird die Phänomenologie des Baubereichs untersucht und die besonderen Herausforderungen dargestellt, denen sich eine Kreislaufwirtschaft im Baubereich stellen muss.

Hierzu gehören neben dem Problem der großen Mengen und der stofflichen Zusammensetzung im Baubereich eine Darstellung der langen Verweilzeiten und der unterschiedlichen Lebensdauern von Produkten, der Komplexität der involvierten Akteure sowie eine Diskussion der rechtlichen Grundlagen der Bauabfallbehandlung nach dem Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz. Die Charakterisierung des Baubereichs dient später sowohl als Motivation als auch als konkrete Veranschaulichung für das zu entwickelnde Modell.

Gegenstand von **Kapitel 4** ist die Herleitung eines Modells zur Beschreibung der Stoffströme und Stofflager nach den drei Dimensionen qualitative Zusammensetzung, Verweilzeit der Produkte im Stofflager sowie absolute Menge der Ströme und Lager. Zur Beschreibung der qualitativen Zusammensetzung wird ein auf der Nutzwertanalyse basierendes Scoring-Modell entwickelt, das die Dispersion im Stofflager nach technologischen, ökologischen, ökonomischen und informatorischen Kriterien beschreibt, und jedem Produkt einen Dispersionsgrad zuordnet. Zur Beschreibung der Verweilzeit im Stofflager werden zunächst Annahmen über eine plausible Lebensdauerverteilung getroffen, die als Parameter Eingang finden in eine kohortenanalytische Betrachtung von Populationen. Die Kohortenanalyse erlaubt ein reichhaltiges Spektrum an Darstellungs- und Analysevarianten in dynamischen Systemen. Die absolute Menge der Stoffströme und Stofflager wird sowohl über einen auf amtlichen Statistiken beruhenden Top-Down-Ansatz als auch über einen Bottom-Up-Ansatz abgeschätzt, der seinerseits auf einer Modellierung des Baubestands nach typischen Eigenschaften beruht. Die Integration der Daten in das Stoffflussmodell nach Brunner wiederum erlaubt einen guten ersten Überblick über die gegenwärtigen Quellen und Senken im technosphärischen Stofffluss und zeigt Relationen zwischen verschiedenen Betrachtungsebenen (Abfallwirtschaft, Bauwirtschaft, Anthroposphäre) auf.

Zentrales Anliegen in **Kapitel 5** ist die konkrete Anwendung des Modells auf den Stoffstrom von Gips. Zunächst erfolgt in einem ersten Schwerpunkt eine Darstellung von Gips hinsichtlich Vorkommen, Verwendung sowie Entsorgung und den damit zusammenhängenden mineralogischen Eigenschaften von Gips. Im Anschluss daran werden die Gipsprodukte auf Dispersionsgrade zugeordnet, eine Zuweisung der typischen Lebensdauerparameter vorgenommen und die Massenbilanz der Stoffströme und Stofflager von Gips aufgestellt. Ergebnis ist eine Darstellung zukünftiger Gipsabfallmengen, die eine stark steigende Gipsabfallmenge in ungünstigen Dispersionsgraden prognostiziert

Kapitel 6 greift das Ergebnis der Modellierung und der Bestandsaufnahme auf und entwickelt Szenarien für die zukünftige Entwicklung der Stoffströme und Stofflager an Gips. Dazu werden Hypothesen über mögliche Veränderungen von Einflussfaktoren aufgestellt, die sowohl auf der Inputseite (verändertes Primärrohstoffangebot, verändertes Nachfrageverhalten) als auch auf Outputseite (Recycling von Gips, Entwicklung neuer Technologien für die Behandlung von Abfallgips) wirken können. Gezielt wird die Möglichkeit einer recyclinggerechten Produktgestaltung eingegangen. Es zeigt sich, dass eine langfristig sichere Steuerung des Stoffstroms Gips nur durch das Zusammenwirken von Maßnahmen auf allen Gebieten möglich ist, wozu wiederum das laufende Zusammenwirken der Akteure bedingt.

Kapitel 7 fasst die wichtigsten Ergebnisse in Thesenform zusammen.

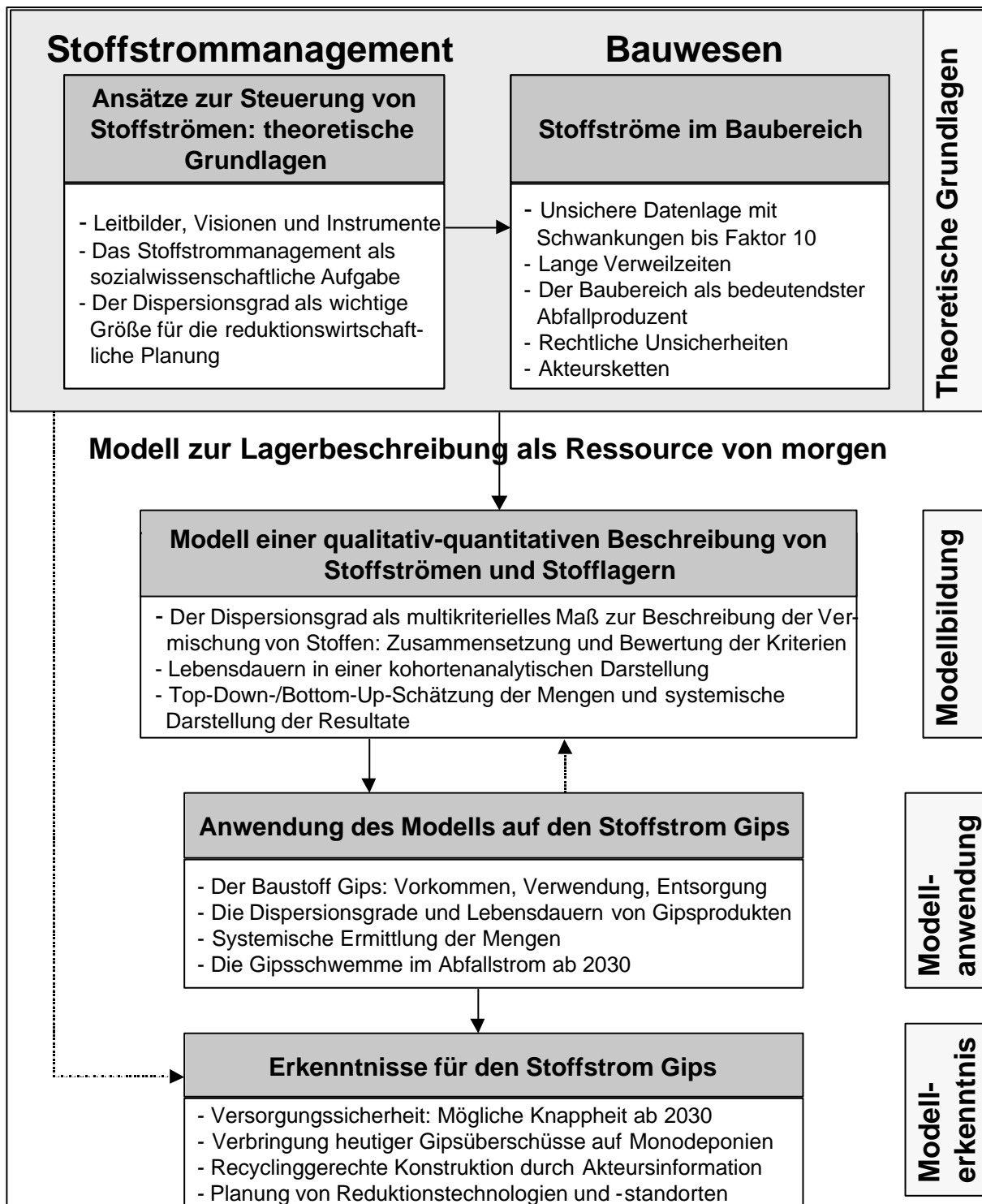


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

2. ANSÄTZE ZUR STEUERUNG VON STOFFSTRÖMEN

Das folgende Kapitel zeigt die Entwicklung des Verständnisses der Steuerung von Stoffströmen auf und verdeutlicht anhand verschiedener Leitbilder für das Stoffstrommanagement, wie Ziele und Vorstellungen für die künftige Gestaltung von Stoffströmen jeweils unterschiedlich gewichtet werden. Diese Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der grundsätzlichen Prämissen eines Verständnisses des Stoffstrommanagements und seiner Realisierbarkeit, hinsichtlich der Frage, ob und welche Regeln bzw. Handlungsleitlinien für die Konkretisierung formuliert werden können sowie hinsichtlich der Überlegungen, wie einzelne Handlungsdimensionen gewichtet, gemessen und bewertet werden können. Im Anschluss daran wird untersucht, welche Bedingungen für die Realisierung eines Leitbilds existieren und schließlich, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die visionäre Zielsetzung umzusetzen. Ziel ist es, aus den verschiedenen Ansätzen Erkenntnisse für das Forschungsanliegen, nämlich die Umsetzung auf den Baubereich, abzuleiten.

2.1 Grundlagen zur Stoffstromsteuerung

Fragen der Abfallwirtschaft und der Eckwerte eines umweltverträglichen Abfallwirtschaftskonzeptes waren der Ausgangspunkt für eine Anwendung des Stoffstromansatzes auf umweltpolitische Aufgaben. Dabei wird unter einem Stoffstrom der Weg eines Stoffes von seiner Gewinnung als Rohstoff über die verschiedenen Stufen der Veredelung bis zur Stufe der Endprodukte, den Gebrauch und Verbrauch des Produktes, ggf. seine Wiederverwendung / Wiederverwertung bis hin zu seiner Entsorgung verstanden¹¹. Das Denken in Stoffströmen entlang des Lebensweges von Stoffen, Produkten, Stoffgruppen sowie die Betonung einer ganzheitlichen, medienübergreifenden Betrachtung wurden durch verschiedene Arbeiten zu Ökobilanzen¹², Produktlinienanalysen, oder zum industriellen Metabolismus¹³ unterstützt, die das Verständnis von Ausmaß und Richtung von Stoffströmen erhöhen. Auch dienten diese Instrumente häufig dazu, im Ablauf von Stoffströmen Maßnahmen zu ergreifen, sobald an einzelnen Stellen Beteiligte in dem von ihnen beeinflussbaren Abschnitt des Stoffstroms eine Gefährdung oder eine Regelabweichung feststellten oder vermuteten. Fragestellungen im Hinblick auf zukünftige Risiken durch heutige Stoffströme waren nicht zentraler Gegenstand der Stoffstromdebatte mit Hilfe von Stoffstromanalysen.

Dieser reaktiven und aus systemischer Sicht suboptimalen Vorgehensweise wird seit etwa Mitte der 80er Jahre durch das Konzept des Stoffstrommanagements eine proaktive und systemische Sichtweise gegenüber gestellt, welches die zielgerichtete Lenkung und Gestaltung anthropogen induzierter Stoffströme beschreibt. Hiermit lassen sich Anforderungen an einen zukünftigen Umgang mit Stoffen formulieren und zu einem visionären Leitbild zusammenfassen, das im Sinne einer normativen Grundlage die Basis für zukünftiges Agieren darstellt. Ausgehend von dieser Zielsetzung, sozusagen dem „Was“ im Hinblick auf die Bewältigung zukünftiger Herausforderungen, werden Handlungsfelder und Maßnahmen abgeleitet, die im Sinne eines „Wie“ in einer möglichst systemischen Betrachtungsweise die Erfordernisse auf dem Weg zur Umsetzung des gewünschten Zielzustands beinhalten.

¹¹ vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 548)

¹² vgl. hierzu etwa die Arbeiten von SETAC zur Standardisierung des Life-Cycle Assessment Tools, die Arbeiten des deutschen Umweltbundesamts sowie die Überlegungen am CML in Leiden (Arbeiten von Guinée, Heijungs und Voet). Als Beispiel sei Kytzia (1995) aufgeführt.

¹³ vgl. hierzu Baccini/Brunner (1991), Ayres (1990) etc.

Management heißt zielgerichtete Führung und Lenkung, Organisation, Planung, Realisierung und Kontrolle und wird u.a. im Sinne der unternehmerischen Betriebsführung verwendet¹⁴. Angewendet auf den stoffpolitischen Zusammenhang heißt das, dass Stoffströme durch entsprechende Änderungen der Rahmenbedingungen in eine z.B. umweltverträglichere Richtung gelenkt werden sollen. Diese Rahmenbedingungen sollten in einer marktwirtschaftlichen Wirtschaftsordnung so gestaltet werden, dass die Marktkräfte im Sinne der Zielsetzung des Stoffstrommanagements wirken. Damit unterscheidet sich das Management von Stoffströmen von einer planwirtschaftlich-dirigistischen Vorgehensweise, indem sie eben gerade nicht im Detail die Handlungen der Akteure zu beeinflussen versucht, sondern sich statt dessen auf die Formulierung von Rahmenbedingungen beschränkt¹⁵.

Mit dem Konzept des Stoffstrommanagements soll ein managementorientierter und ganzheitlicher Weg zur Lösung abfallwirtschaftlicher Probleme beschritten werden, der sich vor allem durch zwei Schwerpunkte auszeichnet:

1. die systematische und ganzheitliche Betrachtung von Stoff- und Energieströmen „von der Wiege bis zur Bahre“ und
2. die Orientierung auf die in diesen Stoffströmen involvierten Akteure¹⁶.

Eine solche Lenkung und Gestaltung vollzieht sich in und durch soziale Systeme, weswegen diese Aufgabe in erster Linie einen organisatorisch-sozialwissenschaftlichen Charakter hat und erst in zweiter Linie naturwissenschaftlich-technischer Natur ist. Jeder Akteur eines sozialen Systems (Person, Haushalt, Unternehmen, Staat,...) betreibt in seinem von ihm beeinflussten Teilbereich eine Art Management von Stoffströmen. Hieraus leitet die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages eine mittlerweile weit verbreitete Definition von Stoffstrommanagement ab: „Unter dem Management von Stoffströmen der beteiligten Akteure wird das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffsystemen verstanden, wobei die Zielvorgaben aus dem ökologischen und ökonomischen Bereich kommen, unter Berücksichtigung von sozialen Aspekten. Die Ziele werden auf betrieblicher Ebene, in der Kette der an einem an einem Stoffstrom beteiligten Akteure oder auf staatlicher Ebene entwickelt“¹⁷.

Wesentliche Voraussetzungen für ein gezieltes und effektives Management von Stoffstromsystemen in Anlehnung an die Definition der Enquête-Kommission lassen sich wie folgt zusammenfassen¹⁸:

- Es gibt Akteure in sozialen Systemen, die steuern *wollen* und dazu über die notwendigen Fähigkeiten und Rahmenbedingungen verfügen. Auf Unternehmensebene drückt sich diese Kompetenz in Umweltmanagementsystemen aus.
- Die Akteure verfügen über ein langfristiges Ziel. In Abhängigkeit der beteiligten Akteure kann das Ziel ökologisch, ökonomisch oder sozial motiviert sein. Häufig wird dabei beobachtet, dass der Anstoß zur Durchführung von Stoffstrommanagement im Sinne einer Vision oder einer Leitlinie (etwa „Sustainable Development“) ökologisch begründet ist, ihre Konkretisierung aber ökonomische Eigenschaften stärker betont (Beherrschung der Produktion, Optimierung der Entsorgungslogistik).

¹⁴ vgl. Handwörterbuch der Betriebswirtschaft

¹⁵ vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 547 f.)

¹⁶ Umweltbundesamt (1997, S. 177)

¹⁷ Enquête-Kommission (1994, S. 549)

¹⁸ vgl. de Man (1994, S. 5 ff.) sowie Enquête-Kommission (1994, S. 554)

- Die Akteure verfügen über ein adäquates Modell, um Ziele und Handlungsoptionen ihres Stoffstrommanagements abbilden zu können.
- Die Akteure besitzen Informationen über den aktuellen Zustand des Systems, die sich auf die Ziele beziehen und die Ableitung von Handlungen ermöglichen. Hierzu zählen etwa Stoffstromanalysen und Materialbilanzanalysen, die sowohl Auskunft geben über alle Akteure und Prozesse im Stoffstrom als auch über die Höhe der Stoffströme und der Stofflager.
- Die Akteure besitzen Instrumente und Werkzeuge, mit deren Hilfe sie den Stoffstrom in die gewünschte Richtung steuern können. Hierzu gehört auch die Möglichkeit, Rahmenbedingungen zu setzen oder zumindest beeinflussen zu können, um die Zielerreichung zu begünstigen.

Obwohl Stoffstrommanagement aufgrund der organisatorisch-sozialwissenschaftlichen Orientierung auf Akteure als ein pragmatischer Ansatz gerühmt wird¹⁹ und eine Reihe von Akteursgruppen beteiligt (Unternehmen, Konsumenten, Verbände), geht die Initiative zur Etablierung weiterhin fast ausschließlich vom Staat aus. Dies liegt an mehreren Ursachen:

- zum einen entstammen die originären visionären Zielsetzungen der Wissenschaft und damit einem „staatsnahen“ Bereich,
- zum zweiten ist der Markt häufig nicht in der Lage, die Notwendigkeit eines proaktiven Stoffstrommanagements aufgrund langer Zeiträume und damit zusammen hängendem nicht adäquatem Niederschlag in Marktpreisen zu erkennen und,
- zum dritten fehlt es nicht-staatlichen Akteuren an der Möglichkeit, Rahmenbedingungen aktiv selbst zu setzen²⁰.

Der Staat handelt durch eine Stoffpolitik, „die die Gesamtheit der politischen Maßnahmen umfasst, mit denen Einfluss auf Art und Umfang der Stoffbereitstellung, der Stoffnutzung sowie der Abfallbehandlung und -lagerung genommen wird, um angesichts der Begrenztheit der Ressourcen und der eingeschränkten Belastbarkeit der Umweltmedien die stoffliche Basis der Wirtschaft langfristig zu sichern“²¹.

¹⁹ vgl. Flatz (1995, S. 49)

²⁰ Die Auffassung des faktischen Initiativprimats durch den Staat wird indirekt auch von der Enquête-Kommission vertreten. Sie stellt fest, dass Stoffstrommanagement sich für wirtschaftliche („natürliche“) Akteure häufig nicht rechnet und die Erwartungen an diese Akteure daher nicht überzogen werden dürften (vgl. Enquête-Kommission, 1994, S. 551).

²¹ Enquête-Kommission (1994, S. 551)

Voraussetzung	Erfüllung im Stoffstrom Gips
Es besteht eine Zielvorstellung, die ökologisch und/oder ökonomisch motiviert ist	<ul style="list-style-type: none"> - Sicherung der Versorgung auch in Zukunft - Beherrschung der Abfallströme zur umweltgerechten Behandlung
Es gibt Akteure in sozialen Systemen, die steuern wollen und über entsprechende Fähigkeiten verfügen	<ul style="list-style-type: none"> - Staat: Steuerungsinteresse Vorsorgeforschung - Unternehmen: Punktuell im Abfallstrom - Haushalte / Individuen: Kein Interesse
Die Akteure verfügen über ein adäquates Modell, um Ziele und Optionen des Stoffstrommanagements abbilden zu können	<ul style="list-style-type: none"> - Kenntnis der aktiven Steuerungsoptionen bei Input, Bestand und Output - Verständnis über Annahmen zukünftiger Trends
Die Akteure besitzen Informationen über den aktuellen Zustand des Systems	<ul style="list-style-type: none"> - Kenntnis über Qualität und Quantität der Ströme und Lager - Gezielte Zusammenarbeit auf allen Ebenen

Tabelle 2.1: Bedingungen für ein effektives Stoffstrommanagement

Häufig geht der Anstoß zur Untersuchung des Stoffstroms vom Staat aus, da seitens der anderen Akteure Unternehmen und Haushalte kein oder nur ein geringes Interesse erkennbar ist. Wesentlicher Grund hierfür ist die Langfristigkeit, mit der Auswirkungen eines Stoffstroms sichtbar werden und die sich dem ökonomischen Handeln der Akteure zunächst entziehen. Der Staat muss also zunächst seine Zielvorstellung bei der Stoffstromsteuerung formulieren und an die anderen Akteure kommunizieren. Hierzu ist eine umfassende Informations- und Datenbasis über den aktuellen Zustand des Systems erforderlich, mit deren Hilfe ein allgemein akzeptiertes Verständnis über die aktuelle Problemlage sowie über zukünftige Entwicklungen hergestellt werden kann.

2.2 Leitbilder des Stoffstrommanagements

Leitbilder des Stoffstrommanagements sollen eine grundsätzliche Orientierung geben, in welche Richtung sich der Umgang mit Stoffen in der Gesellschaft entwickeln sollte. Sie sollen²²:

- Wege skizzieren, wie man aus der heutigen Situation der Stoffnutzung schrittweise in einem bestimmten Zeitabschnitt zu einer veränderten Stoffnutzung gelangen kann
- helfen, Kriterien für diese Wege festzulegen
- sich an die involvierten Akteure richten

²² vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 36)

- meinungsbildend wirken in der Suche nach Zielen
- die Verständigung über die Elemente der Leitbilder erleichtern und damit die Bestimmung der Ziele und die Maßnahmen fördern

Sie entspringen meist einer ökologischen Grundvision und sollen angeben, wie der Mensch gegenüber natürlichen Prozessen handelnd eingreifen kann. Die Leitbilder sind daher alle- samt mehr oder minder anthropozentrisch ausgelegt, da sie von einem Eingriff durch den Menschen ausgehen, der zum Wohl des Menschen erfolgt. Durch ihren visionären Charakter besitzen sie meistens eine normative Dimension und formulieren allgemein gehaltene Ziel- setzungen, über die zumeist ein breiter gesellschaftlicher Konsens herrscht. Die Notwendig- keit, Forderungen der Leitbilder konkret zu operationalisieren und in klare Handlungsoptio- nen zu überführen, führt jedoch häufig zu kontroversen und divergierenden Standpunkten der einzelnen Akteure.

Leitbild	Betrachtungs- dimension	Ansatzpunkt	Ziel	Kritik
Nachhaltige Entwicklung	Gesamtes öko- logisches und gesellschaft- liches System	Konstanz des natürlichen Kapi- talstocks	Intergenerationale und intrageneratio- nale Gerechtigkeit	Keine klaren Zielformulier- ungen
Bio- und Mine- ralzyklus	Gesamtes Sys- temgefüge der Bio- und Anthro- posphäre	Gesamte anthro- pogen induzierte Stoffströme	Stofftransport in Zeiträumen analog den natürlichen Prozessen	Trennung in Bilanzgebiete schwer mög- lich
Faktor 10- Modell	physikalisch	Aufnahme der Stoffe aus den Umweltsystemen in die Anthro- posphäre	Inputreduktion von Stoffströmen	Vermengung von physikali- schen Indika- toren u. sozia- len Ansätzen
Regional geo- gene Verhält- nisse	geogene regio- nale Stoffvaria- tion	Rückführung der Stoffe aus der anthropogenen Nutzung in die Umweltsysteme und Akkumulati- on	Anthropogene Stoffrückführungen dürfen die natürl- ichen Variationen der geogenen Stoffströme nicht überschreiten	zu starker Elementbezug; schlecht an- wendbar auf sich zerset- zende Sub- stanzen
Leitbild der Ab- fallwirtschaft	Betrachtung der Abfallwirtschaft als Teil der Stoffwirtschaft	Rückführung der Stoffe aus der anthropogenen Nutzung in die Umweltsysteme	Zielhierarchie und Grundsätze der Abfallwirtschaft	Zielhierarchie findet in der Gesetzgebung nur geringen konkreten Nie- derschlag

Tabelle 2.2: Übersicht über Leitbilder des Stoffstrommanagements

Im folgenden werden die oben aufgelisteten Leitbilder des Stoffstrommanagements kurz skizziert, wobei auf das Konzept der „Nachhaltigen Entwicklung“ detaillierter eingegangen wird, indem ein kurzer Abriss über die Historie der Nachhaltigkeitsdebatte gegeben wird.

2.2.1 Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“

In der Folge des Ende des 18. Jahrhunderts einsetzenden Industrialisierungsprozesses konzentrierte sich für die meisten Menschen in Europa und Amerika bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts hinein die Frage nach Kriterien und Wegen gesellschaftlicher Entwicklung weitestgehend auf ökonomische und soziale Aspekte. Pure Überlebensfragen sowie die Regelung von Arbeitsbedingungen standen für sie deutlich im Vordergrund.

In den Anfängen wirtschaftswissenschaftlicher Analysen wurde der Faktor Natur (im Sinne von Ressourcen oder Boden) noch vielfach ins Zentrum der Betrachtungen gestellt. Quesnay bezeichnete Mitte des 18. Jahrhunderts in seiner Kritik am Merkantilismus die Natur als „Quelle allen Reichtums“. Auch rund 50 Jahre später erkannten die Ökonomen der Klassik (Smith, Ricardo) die begrenzte Tragekapazität der Natur an, was sich in der Aufnahme als einer der drei Produktionsfaktoren in der ökonomischen Theorie widerspiegelt. Die Prognose von Malthus über Hungersnöte, Epidemien und Kriege als Folge des Missverhältnisses zwischen Bevölkerungswachstum und Ressourcenvorrat in einem Raum gilt als erstmalige systemtheoretische Abhandlung über Wachstumsgrenzen in einer endlichen Welt. Durch die technologische Entwicklung in der Landwirtschaft konnte die pessimistische These von Malthus widerlegt werden, weswegen der Faktor Natur bzw. Boden in der neoklassischen Theorie weitgehend ausgeblendet wurde.

Eine zeitlich exakte Festlegung über die Entstehung des Nachhaltigkeitsbegriffs und seiner erstmaligen Erwähnung ist kaum möglich. Vielfach wird hier die Abhandlung „Sylvicultura Oeconomica“ des sächsischen Oberberghauptmanns von Carlowitz aus dem Jahre 1713 als Quelle genannt²³. Für von Carlowitz beruhte eine nachhaltige Forstwirtschaft auf dem Grundsatz, dass nur so viel Holz geschlagen werden darf, wie durch Baumneupflanzungen nachwachsen kann. Dieses Prinzip wurde dann Ende des 18. Jahrhunderts in der deutschen Forstwirtschaft per Gesetz festgeschrieben, woraus sich in der bis heute dominierenden waldbaulichen Praxis ein aus ökologischen und ökonomischen Kriterien gebildeter Maßstab für Nachhaltigkeit etabliert hat. Mit dem Konzept des „maximum sustainable yield“ fand der Nachhaltigkeits- bzw. Sustainability-Begriff Anfang des 20. Jahrhunderts auch Eingang in die Fischereiwirtschaft.

Mehr als 200 Jahre lang war das Prinzip der Nachhaltigkeit in industrialisierten Staaten auf die Forst- und Fischereiwirtschaft begrenzt. Auf die übrigen Bereiche des Wirtschaftens hatte es letztlich kaum nennenswerten Einfluss. Hier kommt bemerkenswerterweise das betriebswirtschaftliche Prinzip der Abschreibung für Abnutzung dem Erhaltungsziel bzw. dem Ziel, von den Erträgen und nicht von der Substanz zu leben, wohl noch am nächsten.

Anfang der 70er Jahre wurde, initiiert durch den Club-of-Rome-Bericht, infolge der Ressourcenfrage erstmalig intensiver über die Zusammenhänge zwischen gesellschaftlichen Produktions- und Lebensstilen, Wirtschaftswachstum und der Verfügbarkeit bzw. Endlichkeit von Ressourcenbeständen nachgedacht und diskutiert. Auch die Zunahme verschiedener Umweltbelastungsprobleme, etwa durch Luftschadstoffemissionen, trug dazu bei, dass nun

²³ vgl. Peters (1984), Schanz (1996), Voss (1997)

Umweltaspekten größeres Gewicht in der Entwicklungsdebatte beigemessen wurde, so durch die Gründung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) oder die Einrichtung von Umweltministerien in zahlreichen Staaten. In der Folgezeit wurden verschiedene Konzeptvorschläge in die seit den 50er Jahren sehr kontrovers geführte internationale entwicklungspolitische Diskussion gebracht, die allerdings letztlich wenig Niederschlag in der Politik fanden. So wurde beispielsweise der von UNEP kreierte „Ecodevelopment“-Ansatz, der die Komponenten Grundbedürfnisbefriedigung, Umweltschutz und Partizipation zu vereinbaren versuchte, nicht zuletzt deswegen heftig kritisiert, weil dort Macht- und Verteilungsfragen auf internationaler wie nationaler Ebene zumindest implizit angesprochen wurden²⁴. Einen weiteren Akzent in der Debatte setzten auch die „Erklärung von Cocoyok“ 1974 und der Dag-Hammarskjöld-Report 1975, in dem erstmals neben dem Fehlzustand der Unterentwicklung auch die Überentwicklung, insbesondere bezogen auf die Lebensstile der Industriestaaten, angeprangert wurde²⁵.

Mit Beginn der 80er Jahre etablierte sich eine veränderte Sicht auf die ökologische Entwicklungsdimension. Angesichts der Erkenntnis, dass sich die Umweltsituation trotz des unzweifelhaft gewachsenen Problembewusstseins und teilweise erheblicher, vor allem in den Industriestaaten auf lokaler Ebene auch partiell erfolgreicher umweltpolitischer Anstrengungen im globalen Maßstab noch deutlich verschlechtert hatte, erschien 1980 zum ersten Mal der Begriff des „Sustainable Development“ in einem Papier, das vorwiegend im wissenschaftlichen Kreis zirkulierte²⁶. Zentrale These dieses Dokuments war, dass ökonomische Entwicklung ohne die Erhaltung der Funktionsfähigkeit der Ökosysteme auf lange Sicht nicht aufrecht erhalten werden könne und ökonomische Gewinne aus der übermäßigen Ausbeutung dieser Systeme nur auf Zeit möglich seien.

Der ebenfalls 1980 erschienene Bericht „Global 2000“ versuchte die Ressourcen- und Bevölkerungsproblematik zu verdeutlichen. Hierfür wurde die Form eines prognostizierten Krisenszenarios unter der Annahme einer weitgehenden Fortführung der damaligen Politik gewählt.

Im Hinblick auf die Wahrnehmung und Behandlung von Umweltproblemen setzte eine allmähliche und bis heute andauernde Schwerpunktverlagerung von der Ressourcen- hin zur Senkenproblematik ein, also der Beeinträchtigung der Aufnahme- und Verarbeitungskapazitäten der Ökosysteme. Ausschlaggebend hierfür war zum einen, dass infolge technischen Fortschritts zunehmend ressourcensparsamere Produktionstechnologien eingesetzt werden konnten; zum anderen wurden für manche Rohstoffe immer wieder neue Vorkommen entdeckt. Die Tatsache, dass sich die Problematik anthropogener Klimaveränderungen und deren Folgewirkungen für ökologische wie sozioökonomische Systeme zu einem langanhaltenden herausragenden Umweltthema entwickelte, ist ein Indiz für diese sich wandelnde Sichtweise. Dieses Szenario war Ausgangspunkt für die Erstellung des Brundtland-Berichts, der maßgeblich für die Entwicklung des Leitbildes „Nachhaltige Entwicklung“ ist.

Das Konzept der „Nachhaltigen Entwicklung“ (sustainable development) ist sicherlich das bekannteste, in seinen Formulierungen aber auch visionärste Bild für ein Stoffstrommanagement. Bekannt wurde dieser Begriff nach der Veröffentlichung des Brundtland-Berichtes 1987. Diese UN-Konferenz ging bei der Definition des Begriffes „Sustainable Development“

²⁴ vgl. Harborth (1991, S. 24 ff.)

²⁵ vgl. Harborth (1991, S. 27 ff.)

²⁶ vgl. etwa Tisdell (1985), Redclift (1987)

vom Kriterium der Chancengleichheit zukünftiger Generationen aus und forderte die nachhaltige Ausrichtung der menschlichen Handlungen bzw. der davon ausgehenden Einflüsse auf die Natur, um in einem globalen Maßstab für eine unbestimmte Anzahl künftiger Generationen die natürlichen Systemen und Ressourcen auf diesem Planeten zu erhalten und damit die Handlungsoptionen für nachfolgende Generationen nicht über das heutige Maß hinaus einzuschränken. Ansätze zu einer nachhaltigen Entwicklung orientieren sich sowohl an den Gesetzmäßigkeiten ökologischer Systeme als auch an den Postulaten sozial-ethischen Handelns.

Zentrales Anliegen in der sozial-ethischen Dimension sind die Erfüllung der Bedürfnisse der Armen bzw. Benachteiligten (intragenerationale Gerechtigkeit) sowie der Einbeziehung der Bedürfnisse künftiger Generationen in heutige Überlegungen und Entscheidungen im Sinne einer intergenerationalen Gerechtigkeit²⁷.

Im Mittelpunkt des ökologischen Grundgedankens steht die Bedingung der langfristigen Erhaltung der Funktionen des ökologischen Systems, ausgedrückt über die Konstanz des natürlichen Kapitalstocks²⁸. Diese Forderung nach Konstanz des natürlichen Kapitalstocks spiegelt sich in folgenden Postulaten wider²⁹:

1. Die Abbaurate bei erneuerbaren Ressourcen darf ihre Regenerationsrate nicht übersteigen.
2. Die anthropogenen Stoffeinträge in die Ökosysteme dürfen die lokale Assimilationsfähigkeit nicht überschreiten und müssen sich daher an der Belastbarkeit der Umweltmedien orientieren. Anthropogen induzierte Materialströme dürfen die globalen Pufferspeicher in den Stoffkreisläufen in ihrer Größe nicht ändern.
3. Nicht erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.
4. Das Zeitmaß der anthropogenen Einträge in die Ökosysteme muss im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse stehen.

Nach der Formulierung dieser Leitlinien im Jahr 1994 wurde von einigen Seiten Kritik laut, wonach die Postulate zu wenig normativ seien, da sie die organisatorisch-sozialwissenschaftliche Bedeutung von Stoffstrommanagement nicht genügend herausstellen, sondern statt dessen eher aktuelle Problemlagen wie die Risikominimierung von Schadstoffen und akute Belastungsgrenzen fokussieren würden³⁰. Außerdem sei die Bedeutung der ökonomischen und der sozialen Komponente von Stoffstrommanagement nicht genügend berücksichtigt. Dies führte im darauf folgenden Bericht der Enquête-Kommission zu einer Erweiterung der Nachhaltigkeitsregeln, wobei die bereits bestehenden Postulate als Regeln für ökologische Nachhaltigkeit gefasst und um eine fünfte Regel erweitert werden:

5. Gefahren und unvermeidbare Risiken für die menschliche Gesundheit durch anthropogene Einwirkungen sind zu vermeiden.

²⁷ vgl. Hönig/Schäffler (1996, S. 12)

²⁸ vgl. Pearce/Turner (1990, S. 43 f.)

²⁹ vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 39)

³⁰ vgl. Reiche (1995, S. 10)

Zusätzlich werden Regeln für soziale Nachhaltigkeit aufgestellt³¹:

1. Der soziale Rechtsstaat soll die Menschenwürde und die freie Entfaltung der Persönlichkeit sowie die Entfaltungschancen für heutige und zukünftige Generationen gewährleisten, um den sozialen Frieden zu bewahren.
2. Jedes Mitglied der Gesellschaft erhält Leistungen von der solidarischen Gesellschaft entsprechend geleisteter Beiträge für die sozialen Sicherungssysteme sowie entsprechend der Bedürftigkeit, wenn keine Ansprüche an die sozialen Sicherungssysteme bestehen.
3. Jedes Mitglied der Gesellschaft muss entsprechend seiner Leistungsfähigkeit einen solidarischen Beitrag für die Gesellschaft leisten.
4. Die sozialen Sicherungssysteme können nur in dem Umfang wachsen, wie sie auf ein gestiegenes wirtschaftliches Leistungspotenzial zurückgehen.
5. Das in der Gesellschaft insgesamt und in den einzelnen Gliederungen vorhandene Leistungspotenzial soll für künftige Generationen zumindest erhalten werden.

Die Ergänzung für die ökonomische Sicht lautet wie folgt:

1. Das ökonomische System soll individuelle und gesellschaftliche Bedürfnisse effizient befriedigen. Dafür ist die Wirtschaftsordnung so zu gestalten, dass sie die persönliche Initiative fördert (Eigenverantwortung) und das Eigeninteresse in den Dienst des Allgemeinwohls stellt (Regelverantwortung), um das Wohlergehen der derzeitigen und künftigen Bevölkerung zu sichern. Es soll so organisiert werden, dass es auch gleichzeitig die übergeordneten Interessen wahrt.
2. Preise müssen dauerhaft die wesentliche Lenkungsfunction auf Märkten wahrnehmen. Sie sollen dazu weitestgehend die Knappheit der Ressourcen, Senken, Produktionsfaktoren, Güter und Dienstleistungen wiedergeben.
3. Die Rahmenbedingungen des Wettbewerbs sind so zu gestalten, dass funktionsfähige Märkte entstehen und erhalten bleiben, Innovationen angeregt werden, dass langfristige Orientierung sich lohnt und der gesellschaftliche Wandel, der zur Anpassung an zukünftige Erfordernisse nötig ist, gefördert wird.
4. Die ökonomische Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft und ihr Produktiv-, Sozial- und Humankapital müssen im Zeitablauf zumindest erhalten werden. Sie sollten nicht bloß quantitativ vermehrt, sondern vor allem auch qualitativ ständig verbessert werden.

Versuche zur Operationalisierung einer konkreteren nachhaltigen Entwicklung hängen jedoch entscheidend davon ab, inwieweit auf die Zukunft gerichtet die Leistungsfähigkeit und die Belastbarkeit der Natursysteme hinsichtlich der Funktionen Ressourcenbereitstellung und Rückstandsaufnahme bestimmt und Evaluierungskriterien abgeleitet werden können³². Hier zeigen sich zum Teil erhebliche Differenzen in der Festlegung von Zielen und Handlungen.

³¹ Enquête-Kommission (1998, S. 34)

³² vgl. Enquête-Kommission (1993, S. 38)

2.2.2 Leitbild der Kreislaufwirtschaft aus der Sicht des Bio- und Mineralzyklus

Das von der österreichischen Forschergruppe SUSTAIN im Jahr 1994 entwickelte Leitbild der Kreislaufwirtschaft aus der Sicht des Bio- und Mineralzyklus unterscheidet zwischen den drei ideellen Stoffbilanzgebieten Biosphäre (Atmosphäre, Wassersystem, Boden und Biomasse), Mineralsphäre bzw. Lithosphäre (alle Stoffe, die nicht oder nur in geringstem Ausmaß an den dynamischen Stoffkreisläufen der Biosphäre teilnehmen) und Anthroposphäre (alle Stoffe, die in menschlichem Ge- oder Verbrauch stehen), durch die die Stoffflüsse auf der Erde bestimmt sind³³. Dabei werden die beiden Bilanzgebiete Biosphäre und Mineralsphäre auch zur Umwelt zusammengefasst, für das Bilanzgebiet der Anthroposphäre kann synonym der Begriff der Technosphäre in Anlehnung an Liesegang und Schmidt-Bleek verwendet werden³⁴.

Die Bilanzgebiete unterscheiden sich nach folgenden Charakteristika:

- Verschiedenheit der Zeithorizonte (lange Zeiträume in der Mineralsphäre, kurze Zeiträume in der Anthroposphäre, Zeiträume in Abhängigkeit der eingestrahnten Sonnenenergie in der Biosphäre). Insbesondere der Austauschprozess zwischen Biosphäre und Mineralsphäre läuft in sehr langen Zeiträumen ab.
- Der zeitliche Verlauf des Massenaustausches zwischen Biosphäre und Mineralsphäre wird seit Beginn der Industrialisierung durch Zu- und Entnahmen aus der Anthroposphäre gestört (etwa hoher Verbrauch fossiler Rohstoffe aus der Mineralsphäre und rasche Akkumulation des freigesetzten Kohlenstoffs in der Biosphäre).

Die aus den unterschiedlichen zeitlichen Dimensionen herrührenden Probleme beim anthropogen induzierten Massenaustausch zwischen den Bilanzgebieten führt zur Aufstellung folgender Postulate an das Leitbild einer Kreislaufwirtschaft, die deutliche Ähnlichkeiten zur vierten Regel der Enquête-Kommission (ausgewogenes Zeitmaß im Verhältnis der Reaktionsgänge) aufweisen³⁵:

1. Das Bemühen des Stoffstrommanagements muss darauf ausgerichtet sein, die wesentlichen Stoffströme in ihrer Größe und Art innerhalb des zugehörigen Bilanzgebiets zu schließen. Sofern dies nicht möglich ist, sollte der Austausch innerhalb von zwei Bilanzgebieten beschränkt bleiben.
2. Das Leitbild erfordert eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Zeitkonstanten in den Zyklen. Damit ist garantiert, dass nicht Vorgänge mit stark unterschiedlichen Zeitkonstanten fest miteinander gekoppelt und damit die Prinzipien der Bilanzgebiete verletzt werden.
3. Jede Nutzung natürlicher Produktionsressourcen im Biosphärenzyklus hat so zu erfolgen, dass sie auf unabsehbare Zeit in gleicher Weise möglich ist. Beispiele hierfür sind die Nachhaltigkeitsgrundsätze der Forstwirtschaft und der Fischereiwirtschaft.

³³ vgl. SUSTAIN (1994, S. 17)

³⁴ vgl. Schmidt-Bleek (1994, S. 123) sowie Sterr (1999, S. 3). Schmidt-Bleek definiert Technosphäre in einem volkswirtschaftlichen Kontext als ein Subsystem der Ökosphäre, das alle menschlichen Aktivitäten umfasst. Auf der Inputseite bezieht er dabei praktisch alle Inputstoffe mit ein, sobald sie von Mensch oder Maschine berührt werden. Auf der Outputseite ist für ihn die Grenze der Technosphäre dort erreicht, wo die kommerziellen Interessen des Menschen an den Stoffströmen aufhören.

³⁵ vgl. Flatz (1995, S. 72 f.). Dabei ist die Nähe zur vierten Regel der Enquête-Kommission und dessen Detaillierung eher zufällig.

4. Die Stoffströme zwischen Anthroposphäre und Mineralsphäre sollten größenordnungsmäßig auf jenes Niveau gebracht werden, dass durch natürliche Vorgänge vorgegeben ist. Dies entspricht dem Leitbild des regional-geogenen Gleichgewichts.
5. Mineralische Stoffe sollten so lange wie möglich in menschlicher Nutzung gehalten werden. Die Dissipation und Nicht-Mehr-Verfügbarkeit dieser Stoffe muss minimiert werden.
6. Beide Zyklen fordern ein gezieltes Rückbringen der Stoffströme in die Natur, sofern sie für die anthropogene Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen. Während die Rückbringung von Stoffen des Mineralzyklus wie etwa Schwermetalle zentral erfolgen muss, geschieht der Abbau biogener Stoffe dezentral.

Das Leitbild leistet wertvolle Hinweise bei der Fokussierung der Betrachtung auf unterschiedliche Bilanzgebiete, die unterschiedliche Aufnahmekapazität und Reaktionsvermögen aufweisen. Es fällt jedoch häufig schwer, die Bilanzgebiete eindeutig voneinander zu trennen. So ist z.B. die Frage, ob deponiertes Material aufgrund seiner Eigenschaften der Anthroposphäre oder der Mineralsphäre zuzuordnen ist, häufig nicht trennscharf zu beantworten. Ebenso sind vermeintlich kurze Reaktionszeiten von Umweltbereichen kein Hinweis darauf, dass Austauschprozesse günstiger sind als andere. Ferner bleibt festzuhalten, dass dieses Leitbild stark die naturwissenschaftliche Herkunft betont und Aspekte der Umsetzung in und durch soziale Prozesse weitgehend unbeachtet lässt.

2.2.3 Das Faktor 10-Modell³⁶

Grundidee des am Wuppertal-Institut 1994 entwickelten Faktor 10-Modells ist eine Reduktion der Stoffströme auf ein Maß, das eine Restabilisierung der Ökosphäre für eine dauerhafte Nutzung möglich macht³⁷. Zentraler Weg hierzu ist eine globale Stoffstromreduktion von 50 %, und zwar zunächst unabhängig vom Gefährdungspotenzial, das von einem Stoffstrom ausgeht. In den stoffreichen Ländern der westlichen Welt erfordert dieses Ziel eine Dematerialisierung der wirtschaftlichen Aktivitäten um den Faktor 10 in einem Zeitraum von 50 Jahren. Die Reduktion kann in Teilbereichen, etwa der Chlorchemie, noch deutlich über 50 % ausfallen, desgleichen muss sie die lokale Beanspruchung von Ökosystemen berücksichtigen und hier gezielte Eingriffe ermöglichen. Damit die Stoffströme um den Faktor 10 reduziert werden können, sind nach Ansicht der Entwickler des Leitbilds drei wesentliche Ansatzpunkte erforderlich:

- Steigerung der **Effizienz** durch technologische Innovationen, ausgedrückt durch eine starke Erhöhung der Ressourcenproduktivität, verbunden mit einer Dematerialisierung durch Dienstleistungen,
- Verbesserung der **Konsistenz**, um parallele und unvereinbare Prozesse aufeinander abzustimmen, sowie
- Beitrag durch **Suffizienz**, wonach tendenziell eine Reduzierung des materiellen Wohlstands angestrebt werden soll.

Um die Intensität der Umweltbeeinflussungen durch Stoffströme zu messen, wird über den gesamten Lebensweg eines Produkts die insgesamt bewegte Masse und Energie berechnet und auf Nutzungseinheiten umgelegt, die sich aus den zu erwartenden Leistungen eines

³⁶ vgl. zu den Ausführungen des Faktor 10-Modells Schmidt-Bleek (1994)

³⁷ vgl. Schmidt-Bleek (1994, S. 167 ff.)

Produkts während seiner Lebensdauer ergeben³⁸. Die daraus ermittelte MIPS (Material Intensity Per Service Unit) dient als Indikator zur Messung der Materialintensität einzelner Dienstleistungen und soll eine Reduktion der Stoffströme ermöglichen. Mit zunehmenden Dienstleistungseinheiten eines Produkts nimmt MIPS ab, dies gilt auch dann, wenn der Materialverbrauch durch Maßnahmen sinkt, die während der Gebrauchs- oder Recyclingphase greifen. Dabei können Maßnahmen im Rahmen der Herstellung (Transport, Verpackung, Fertigung), des Konsums (Betreiben, Warten, Reinigen, Reparieren) als auch der Entsorgung ansetzen (Sammeln, Sortieren, Aufarbeiten). Ferner sind neuartige Verfahren von Eigentumszuweisungen wie Leasing oder Pooling geeignet, MIPS von Produkten zu senken.

Das MIPS-Konzept besticht durch seine Einfachheit, unterschiedlichste Vorgänge und komplexe Zusammenhänge in einer Kennziffer abzubilden, die als Anhaltspunkt für die Beurteilung der ökologischen Vorteilhaftigkeit dienen kann und sowohl von Experten als auch von Laien verstanden wird. Neben der Einfachheit liegt seine wesentliche Stärke darin, dass es die Inputströme in die Technosphäre explizit fokussiert, da es fordert, Produkte so zu entwickeln, dass der Nutzen einer spezifischen Masseinheit maximiert wird. Ferner richtet sich der Ansatz durch die Forderung nach Erhöhung der Nutzungsintensität gezielt auf organisatorische und sozialwissenschaftliche Aspekte des Stoffstrommanagements.

Hingegen wird Kritik am Verfahren dahingehend geäußert, dass die Voraussetzung, eine Reduktion von Materialströmen sei gleichbedeutend mit einer günstigeren weil nachhaltigeren Entwicklung, nicht pauschal übernommen werden könne. Zudem handele es sich um einen produkt- und nicht um einen stoffbezogenen Ansatz, der ferner nicht das spezifische Gefährdungspotenzial vieler Stoffströme adäquat berücksichtige. Als weiterer Kritikpunkt wird angeführt, dass MIPS eine Vergleichbarkeit von zwei Alternativen aufgrund der vielen Voraussetzungen und Annahmen praktisch nicht ermögliche.

Das Faktor 10-Modell setzt am deutlichsten von allen bisher veröffentlichten Leitbildern an der Inputseite in die Anthroposphäre an, indem es die Inputreduktion von Stoffströmen explizit fordert. Obwohl es daher vom Charakter her eine starke sozial-gesellschaftliche Ausrichtung (Revolution von Effizienz und Suffizienz) besitzt, wird versucht, die Betrachtungsweise mit physikalischen Maßeinheiten (Massenstrom) durchzuführen.

2.2.4 Gestaltung der Stoffwirtschaft im Einklang mit regionalen geogenen Verhältnissen

Im Vergleich zum Faktor 10-Modell des Wuppertal-Instituts beschäftigt sich dieses von Baccini und Brunner entwickelte Leitbild hauptsächlich mit der Rückführung von Stoffen aus der anthropogenen Nutzung in die Umweltsysteme³⁹. Der Ansatz zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit der durch die Rückführung induzierten Stoffströme besteht darin, sie an den natürlichen Stoffströmen zu messen. Eine Störung dieser Flüsse ist dann zu erwarten, wenn der anthropogene Anteil eine Größenordnung annimmt, der die regionalen natürlichen Veränderungsdaten, die in einer Größenordnung von 1 - 10 % des Gesamtinventars angenommen werden, übersteigt: „Von einem konservativen Standpunkt aus könnten anthropogen induzierte Stoffflüsse dann als umweltverträglich bezeichnet werden, wenn sie langfristig die geogenen Flüsse und Reservoirs um weniger als 1 - 10 % verändern“⁴⁰.

³⁸ vgl. Schmidt-Bleek (1994, S. 108 ff.)

³⁹ vgl. Baccini/Brunner (1991)

⁴⁰ Brunner (1992, S. 57)

In mehreren umfangreichen Studien wurden die natürlichen und anthropogenen Stoffströme und Stofflager erhoben und miteinander verglichen. Diese waren meistens regional ausgerichtet⁴¹, oder erfassten den Stoffhaushalt von Unternehmen durch Erweiterung zu einer Stoffbuchführung.

In der konkreten Umsetzung wird auf der Grundlage von chemischen Elementen gearbeitet und die durch menschliche Aktivitäten (Ernähren, Reinigen, Wohnen und Arbeiten, Transport und Kommunikation) verursachten Flüsse und Akkumulationen ausgewählter Güter und der in ihnen enthaltenen chemischen Elemente mit denjenigen in der Natur verglichen. Mit den Resultaten können nicht nur Aussagen über die Umweltverträglichkeit gemacht werden, sondern es können auch Alternativen für eine Ressourcenbewirtschaftung abgeleitet (etwa das anthropogene Lager an Kupfer in der gebauten Umgebung einer Großstadt) oder Standards für den umweltbewussten Umgang mit Stoffen in einem Industriezweig formuliert werden.

Durch die Regionalisierung erlangt dieses Leitbild einen starken Bezug zu den Aktivitäten, die in Folge der Umweltkonferenz von Rio als „Lokale Agenda 21“ an vielen Orten begonnen wurden. Darüber hinaus ist das Leitbild in der Lage, jederzeit aufgrund einer gesicherten naturwissenschaftlichen Datenbasis für viele Beteiligte nachvollziehbar als Bewertungsinstrumentarium zu dienen. Kritik am Ansatz der regional-geogenen Stoffströme wird an der Eingrenzung auf einzelne Regionen geübt, die in ungünstigen Fällen zu verzerrten Ergebnissen führt, sowie an der leitbildimmanenten Konzentration auf die rein abfallwirtschaftliche Schnittstelle zwischen Anthroposphäre und Umwelt, wodurch die systemische Herausforderung des Stoffstrommanagements nicht unmittelbar deutlich wird. Ferner eignet sich der Ansatz nur für dauerhafte Stoffe, jedoch nicht für synthetische Materialien mit sehr kurzen Lebensdauern. Auch bereitet die Transformation zwischen Güter- und Stoffebene bisweilen Schwierigkeiten bei der Formulierung konkreter Anforderungen und Maßnahmen⁴².

2.2.5 Leitbilder der Abfallwirtschaft

In der Vergangenheit war die Abfallwirtschaft quasi eine Art „Filter“ zwischen Anthroposphäre und Umwelt, der durch ständig steigende Anforderungen angepasst wurde. Gleichzeitig gingen von der Abfallwirtschaft immer Impulse zur ganzheitlichen Betrachtung von Stoffströmen aus. Die daraus entstandenen Leitbilder sind in der Diskussion um das Stoffstrommanagement vielleicht am weitesten entwickelt und haben vielfach schon Eingang in Gesetzestexte und Verordnungen gefunden (vgl. das deutsche Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, das österreichische Abfallwirtschaftsgesetz oder die Technische Verordnung über Abfälle in der Schweiz). Viele der anderen Leitbilder (z.B. regional-geogenes Gleichgewicht) basieren auf Stoffstromüberlegungen in der Abfallwirtschaft und rücken diesen Aspekt in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Für die Schweiz gelten folgende abfallwirtschaftliche Grundsätze⁴³:

1. Die Entsorgung ist als Ganzes umweltverträglich auszubilden und richtet sich nach den Zielen der Gesetze zum Schutz des Menschen und seiner Umwelt. Daraus folgt, dass diejenigen Generationen, die Abfall erzeugen, für die zukunftsichere Deponierung zu sorgen haben, wobei ökonomische Überlegungen nur zweitrangig sein dürfen.

⁴¹ vgl. METAPOLIS für St. Gallen (Baccini et al., 1993) oder PILOT für Wien (Lampert et al., 1996)

⁴² Das Leitbild des regional-geogenen Gleichgewichts wird in Kapitel 5 zur Quantifizierung und Bewertung des Stoffstroms Gips und des Stoffstroms Schwefel in Oberösterreich herangezogen.

⁴³ vgl. BUWAL (1986, S. 6 f.)

2. Die Schweiz entsorgt möglichst vollständig im eigenen Land mit maßgeschneiderten Lösungen für die unterschiedlichen Regionen.
3. Der Bedarf bzw. die Zuteilung an Endlagervolumen muss in die Raumplanung einbezogen werden.
4. Die Deponie stellt die einzige Möglichkeit dar, Stoffe nicht dissipativ aus der Anthroposphäre auszuschleusen. Dabei gilt zunächst der Grundsatz, Stoffe möglichst lange im anthroposphärischen Kreislauf zu halten. Sollte dies nicht mehr möglich sein, sind Mono-deponien anzustreben (nicht dissipative Ablagerung).

Während das deutsche Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz die Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen als Zweck formuliert⁴⁴, werden in Österreich im Abfallwirtschaftsgesetz folgende vier Ziele angesprochen: Schutz des Menschen und der Umwelt, Schonung der Reserven, Schonung des Deponievolumens sowie Nachsorgefreiheit der Entsorgung⁴⁵. In die gleiche Richtung geht auch der in vielen Gesetzestexten formulierte Grundsatz der Abfallwirtschaft, wonach Abfallvermeidung Vorrang vor Abfallverwertung und diese Vorrang vor Abfallbeseitigung besitzt.

Die Ziele der Abfallwirtschaft können grundsätzlich im Kontext des Nachhaltigkeitskonzepts Eingang finden. So wird das Ziel „Umweltschutz“ bereits durch moderne, aber teilweise sehr teure Techniken der Entsorgung erreicht. Um die Ressourcennutzung zu minimieren, sind die Möglichkeiten der Abfallwirtschaft geringer, da es häufig effizienter ist, Maßnahmen bereits bei der Produktion anzusetzen. Allerdings existieren bereits für einige Stoffe wirksame Verfahren wie etwa für Gold oder Quecksilber, bei denen das Ziel der Nachhaltigkeit durch die Abfallwirtschaft wirksam unterstützt werden kann. Es kommt aus Sicht der Abfallwirtschaft vielmehr darauf an, die richtigen quantitativen und qualitativen Signale an Produktion und Konsum zu senden, damit dort nur noch solche Produkte erzeugt werden, die entweder gar nicht in der Abfallwirtschaft behandelt werden müssen oder die durch die Möglichkeiten der Abfallbehandlung hochwirksam behandelt werden können. Diese in einem „Design for Disposal“ zusammengefassten Anforderungen an die Entwicklung leiten sich aus den abfallwirtschaftlichen Zielen, den Kenntnissen der bestehenden und vermuteten zukünftigen Entsorgungsverfahren, den Kenntnissen der stofflichen Dissipation und den Anforderungen an eine nachsorgefreie Deponierung ab⁴⁶.

⁴⁴ vgl. Kapitel 3.6

⁴⁵ vgl. Kapitel 3.3

⁴⁶ Diese Anforderungen an eine recyclinggerechte Konstruktion werden in Kapitel 6 bei der Betrachtung zukünftiger Stoffströme Gips nochmals aufgegriffen.

2.2.6 Reduktionswirtschaft

Die Konzeption der Reduktionswirtschaft stellt die auf betriebswirtschaftlicher bzw. mikro-ökonomischer Ebene durchgeführte Ausgestaltung der Kreislaufwirtschaft dar⁴⁷. Ausgehend von den Anforderungen, die durch das Konzept des Sustainable Development an die Gestaltung von Stoffströmen und die Etablierung der Kreislaufwirtschaft gestellt werden, formuliert die Reduktionswirtschaft einen geschlossenen Rahmen für die Gestaltung und Planung von Reduktionsbetrieben als Analogie zur Produktionswirtschaft. Als Kernaussage wird formuliert, dass die Reduktionswirtschaft ihrem Wesen nach der Produktionswirtschaft identisch ist und daher bekannte Ansätze der Produktionstheorie wie etwa die lineare Aktivitätsanalyse oder die Ressourcen- und Kapazitätsplanung übernommen werden können. Allerdings sind eine Reihe von Ergänzungen und Erweiterungen im Hinblick auf die Produktionstheorie erforderlich, die jedoch allesamt systemkonforme Erweiterungen bestehender Sachverhalte darstellen. Als Beispiele dieser Erweiterungen werden genannt:

- Gleichstellung negativ beurteilter Faktoren (Übel) neben den Gütern (mit positivem Wert)
- Integration ökologischer Parameter über die Modellierung der stofflichen Zusammensetzung
- Erfassung der in der Regel inhomogenen Zusammensetzung der Input-Güter durch relative Zusammensetzungskoeffizienten verschiedener Komponenten
- Darstellung verschiedener Reduktionsprozesse unter Berücksichtigung der Komponentenzusammensetzung

Die reduktionstheoretische Betrachtung wird eingebettet in das betriebswirtschaftliche Gewinnmaximierungsprinzip. Daher ist es erforderlich, grundsätzlich alle Arbeitsgänge, Inputfaktoren und Produktionsfaktoren mit Preisen zu bewerten, die jedoch häufig auch negativ sein können (Güter, Neutra, Übel). Von entscheidender Bedeutung für ein Unternehmen der Reduktionswirtschaft ist es daher, neben einer Maximierung des Umsatzes durch Abverkauf von Reduktionsgütern die Reduktionskosten zu minimieren. Hierauf hat die Zusammensetzung der Inputfaktoren, nämlich des Abfalls, einen entscheidenden Einfluss, da von der Beschaffenheit des Redukts die einzusetzenden Reduktionsprozesse und damit die aufzuwendenden Kosten entscheidend abhängen.

Das Modell zur Beschreibung der qualitativen Zusammensetzung von Bauabfällen (Dispersion) zur Planung der zukünftig anfallenden Inputmengen für die Reduktionswirtschaft soll einen Beitrag zur Erhöhung der Planungssicherheit von Reduzenten leisten.

Das Modell zur Beschreibung der qualitativen Zusammensetzung von Bauabfällen (Dispersion) zur Planung der zukünftig anfallenden Inputmengen für die Reduktionswirtschaft soll einen Beitrag zur Erhöhung der Planungssicherheit von Reduzenten leisten.

⁴⁷ Die Begründung der Reduktionswirtschaft erfolgt Anfang der 90er Jahre durch Liesegang und Dyckhoff. Als Basisarbeit für die betriebswirtschaftstheoretische Beschreibung kann die Arbeit von Souren (1996) angesehen werden. Weitere Konkretisierungen etwa im Hinblick auf die Planungsanforderungen an Reduktionsbetriebe finden sich bei Halfmann (1996).

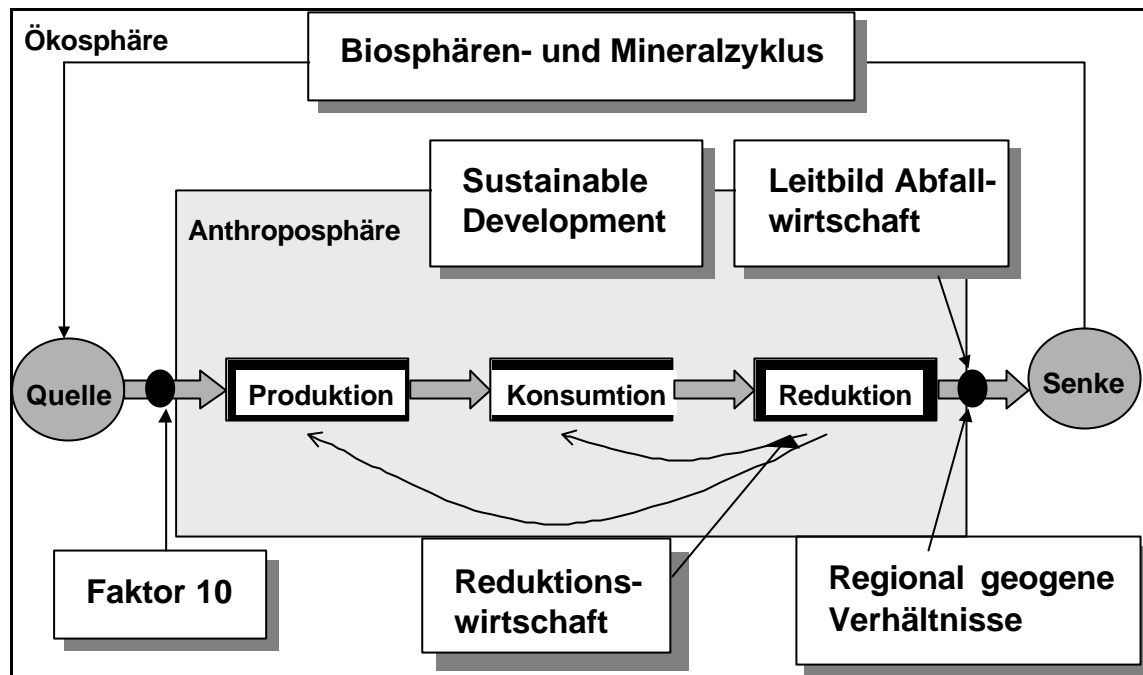


Abbildung 2.1: Zuordnung von Leitbildern des Stoffstrommanagements

2.3 Bedingungsrahmen für Stoffstromsteuerung

2.3.1 Physikalische Rahmenbedingungen

Nach den Gesetzen der Thermodynamik ist es nicht möglich, vollständig geschlossene Stoffkreisläufe im ökonomischen System zu installieren. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nimmt - vereinfacht ausgedrückt - in einem geschlossenen System die Verwertbarkeit von Energie und Stoffen immer weiter ab⁴⁸. Die mit Hilfe von Materialien und Energie produzierten Güter (jeweils Ressourcen niedriger Entropie) werden am Ende ihres Lebenszyklus zu Abfallprodukten, deren Entropie zunimmt. Lediglich mit Hilfe von zusätzlicher Energie ist es möglich, die so verdünnten, vermischten oder verteilten Abfallstoffe in Rohmaterial oder Produkte zurückzuverwandeln und sie so im Kreis zu führen. Für viele Stoffe ist diese erforderliche Energie zur Rückführung jedoch unendlich groß, so dass sie sich von vorne herein verbietet (z.B. der dissipative Verlust von Cadmium in die Atmosphäre durch den Abrieb von Autoreifen). Das Ausmaß der erforderlichen Energie hängt also wesentlich vom Dissipationsgrad des Stoffes ab, dieser wiederum ist bis zu einer bestimmten Größenordnung vom Menschen beeinflussbar (z.B. Getrennsammlung von Abfallstoffen am Anfallort statt energieintensiver nachträglicher Sortierung).

Mit einer unendlich hohen Energie ließen sich also die Kreisläufe des ökonomischen Systems schließen. In Verbindung mit dem ökonomischen System und den begrenzten Energieressourcen muss das Ausmaß des Recycling jedoch beschränkt bleiben. Man wird unter gegebenen Rahmenbedingungen nur soviel Material im Kreis führen, wie dies ökonomisch sinnvoll ist, also ein zusätzlicher Energieeinsatz zur Kreislaufführung einen höheren Nutzen erbringt als der endgültige Verzicht auf das Material. In der Praxis wird sich dieser Sachverhalt dahingehend manifestieren, dass nur ein Teil des Materials im Kreis geführt wird, wäh-

⁴⁸ Eine genauere Diskussion des Entropiekonzepts wird in Kapitel 4.1.1.1 vorgenommen

rend andere Teile endgültig deponiert werden (Recyclingquote). Dieses Problem ist unter ökonomischen Gesichtspunkten vor allem bei nichterneuerbaren, abiotischen Ressourcen evident, da für annähernd alle Zeit auf die Verfügbarkeit des Materials verzichtet wird. Zusätzlich muss hierbei die ökologische Dimension beachtet werden, der nicht im Kreis geführte Anteil der nichterneuerbaren, abiotischen Ressourcen muss unter Beachtung der Aufnahmekapazitäten der Bio- und Mineralsphäre geordnet entsorgt werden. Bei erneuerbaren Ressourcen stellt sich diese Problematik weniger, da sie bei einer Nicht-Kreislaufführung aus ökologischer Sicht von der Umwelt assimiliert werden können und durch ihre Neubildung in ökonomisch vertretbaren Zeiträumen keine Ressourcenknappheit befürchten lassen (z.B. Holz).

Möller/Jeske haben anschaulich dargelegt, dass Materialien in der ökonomischen Welt selbst bei unendlichen Recyclingzyklen nur einen endlichen Beitrag zur Ressourcenstreckung leisten, sofern die Recyclingquote (Verhältnis aus rezykliertem Material zu insgesamt eingesetztem Material) unter 1 liegt, was in der Realität immer der Fall sein wird⁴⁹.

Dazu wird ein System betrachtet, in dem Materialien zu Produkten verarbeitet werden und von einer bestimmten Anzahl n von Materialnutzungszyklen (unter Zuführung von Energie) und einer bestimmten Anzahl k von Produktnutzungszyklen (erneuter Gebrauch nach Beendigung der Nutzungsphase ohne Zuführung von Energie) ausgegangen wird. Die Zahl der Gesamtnutzungen des Produkts ergibt sich zu $N = n \cdot k$ (das Produkt wird zunächst k mal wiederverwendet, bevor es zu einer Materialrezyklierung unter Zuführung von Energie kommt). Für die folgenden Untersuchungen wird jedoch die Zahl der Wiederverwendungen zunächst mit $k=1$ angenommen. Eine höhere Zahl an Wiederverwendungen führt zu keinen grundsätzlich anderen Ergebnissen. Das System befinde sich im Gleichgewicht ohne Pufferbildung, das heißt, dass die pro Zyklus produzierte Menge gleich der ausgetragenen Abfallmenge ist.

Betrachtet man ein System ohne Recycling, bei dem für jede Nutzung die Materialmenge m_F aufzuwenden ist, so ergibt sich die in N Zyklen einzusetzende Gesamtmenge an Material $M_{F(0)}$ zu (Gleichung 1):

$$M_{F(0)} = N \cdot m_F$$

Im folgenden wird das System erweitert und Recycling mit eingeschlossen. Hinsichtlich der Materialnutzung gilt, dass die Recyclingfähigkeit endlich ist mit n Schritten, weil das Material danach ausgesondert und durch frische Ware ersetzt werden muss. Bei der ersten von n Produktionen wird eine komplett frische Produktionsmenge eingesetzt, für die folgenden $(n - 1)$ Zyklen ist Recycling erforderlich.

Das Recycling verläuft so, dass am Ende eines Zyklus aus dem anfallenden Abfall (gleiche Höhe wie die Produktion, da keine Lagerbildung erfolgt) ein Anteil α dem Recycling zugeführt wird. Die nicht rezyklierte Menge $(1 - \alpha)$ wird anschließend deponiert. Die Gesamtnutzungszahl N ist identisch mit der Zahl der Materialnutzungszyklen n .

Die im Laufe von n Zyklen erforderliche Menge an frischem Material ergibt sich als Addition einer kompletten Menge Frischmaterial in der ersten Periode (m_F) sowie einer um den Faktor α reduzierten Menge Frischmaterial in jeder der Folgeperioden, da der Anteil α ja aus dem

⁴⁹ Zu den folgenden Ausführungen vgl. Möller/Jeske (1995, S. 30 f.)

Recyclingmaterial stammt. Insgesamt ergibt sich die gesamte verbrauchte Menge Frischmaterial in allen n Zyklen M_F zu (Gleichung 2 und 3):

$$M_F = m_F + (n-1) \cdot (1-a) \cdot m_F$$

$$M_F = n \cdot m_F \cdot \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot a\right)$$

Erweitert man nun das System und berücksichtigt eine von 1 verschiedene Anzahl von Produktnutzungszyklen k , so ist offensichtlich, dass diese die insgesamt verbrauchte Menge Frischmaterial nicht erhöhen, da die spezifische Recyclingquote bei den Produktnutzungszyklen 1 ist.

Es ergibt sich demnach in $N = n \cdot k$ Zyklen (Gleichung 4):

$$M_F = n \cdot m_F \cdot \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot a\right) \cdot \frac{1}{k}$$

Die durch Recyclingaktivitäten eingesparte Stoffmenge bei N Nutzungen ist die Differenz aus Gleichung (1) und Gleichung (4)

$$\Delta M_F = N \cdot m_F \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot a\right) \cdot \frac{1}{k}\right)$$

Die Ressourcenstreckung S , die durch Recycling bei unveränderter Produktionsrate in N betrachteten Zyklen möglich ist, ergibt sich als Quotient der insgesamt verbrauchten Materialmenge ohne Recycling (Gleichung 1) und der insgesamt verbrauchten Materialmenge mit Recycling (Gleichung 4):

$$S = \frac{M_{F(0)}}{M_F} = \frac{k}{1 - \frac{n-1}{n \cdot a}}$$

Es zeigen sich folgende Ergebnisse:

1. $n = 1$: Bei nur einmaliger Materialnutzung erfolgt keine Ressourcenstreckung.
2. $N \rightarrow \infty$: Bei beliebig häufiger Recycling-Wiederholung konvergiert die Ressourcenstreckung gegen einen festen Wert in Abhängigkeit des Recyclingfaktors α :

$$S = \frac{1}{1-a}$$

Eine bessere Ressourcenstreckung kann also nur erreicht werden, wenn die Recyclingquote angehoben wird. Eine Erhöhung der Zahl der Produktnutzungszyklen bringt keine bessere Ressourcenstreckung.

3. $\alpha = 1$: Das Material wird zu 100 % recykliert. Dann und nur dann ist die Ressourcenstreckung nicht endlich. Wie aus den Gesetzen der Thermodynamik hervorgeht, ist dieser Fall ökonomisch praktisch unmöglich.

Die Höhe der Recyclingquote wiederum kann durch ein aktives Stoffstrommanagement beeinflusst werden. So sind Materialdispersion, Sammellogistik, Produktgestaltungen und Produktanforderungen wesentliche Parameter, mit denen eine verbesserte Ressourcenstreckung erreicht werden kann.

Die Darstellung des Ressourcenstreckungs-Faktors bildet die Basis für praxisnähere Erweiterungen. So sind bei weiterführenden Überlegungen Pufferbildungen im Nutzungssystem zu berücksichtigen (der Produktionsstrom weicht in aller Regel vom Abfallstrom ab), ferner müssen Korrekturfaktoren zur Erfassung von Verlusten während der Produktions-, Nutzungs- und Rezyklierungsphase berücksichtigt werden, die jeweils die erzielbare Recyclingquote vermindern.

Bezogen auf Materialien im Baubereich ist die Pufferbildung im Besonderen zu berücksichtigen, da hier produzierte und als Abfall erscheinende Mengen zur Zeit um den Faktor 10 divergieren, weswegen nur etwa 5 - 7 % des Inputs aus frischem Material durch rezykliertes Material ersetzt werden könnte.

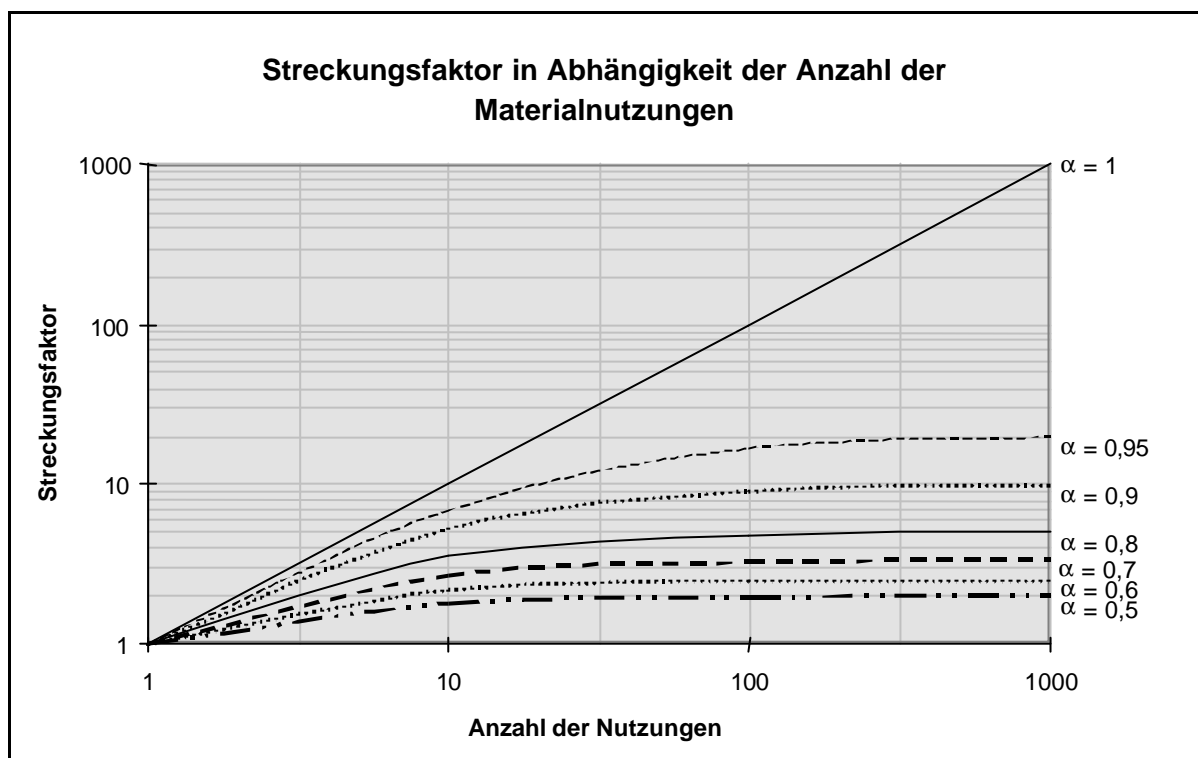


Abbildung 2.2: Streckungsfaktor einer Ressource in Abhängigkeit des Rezykliefaktors

a

2.3.2 Technologische Rahmenbedingungen

Im Gegensatz zu den physikalischen Rahmenbedingungen wie den oben genannten Gesetzen der Thermodynamik oder aber der Unmöglichkeit eines Perpetuum Mobile sind technologische Rahmenbedingungen in ihrem Ausmaß und ihrer Wirkung vom Menschen grundsätzlich beeinflussbar. Es handelt sich dabei um die Summe aller Möglichkeiten, mit Hilfe von Maschinen, Anlagen, Verfahren und Prozessen in allen Stufen des Stoffstroms eine Wertschöpfung durchzuführen. Dabei werden unter diesen technologischen Bedingungen sowohl integrierte Maßnahmen als auch Techniken zusammengefasst, die am Ende einer Stoffstromkette wirken.

Ausmaß und Geschwindigkeit der Weiterentwicklung technologischer Möglichkeiten werden dabei wesentlich von der Zielsetzung und der Bedeutung des Leitbildes bestimmt, mit dem das Stoffstrommanagement betrieben wird. Andererseits wird auch die Ableitung konkreter Zielsetzungen aus einem Leitbild vom aktuellen Stand der Technik beeinflusst.

Den meisten Handlungsansätzen zum Stoffstrommanagement ist der hohe Stellenwert gemeinsam, der den Innovationen und damit der technologischen Weiterentwicklung beigegeben wird. Dies zeigt sich in den eher naturwissenschaftlich orientierten Ansätzen wie dem Leitbild des Bio- und Mineralzyklus, in dem mit Hilfe technologischer Lösungen eine Materialtrennung am Ende des Stoffstroms möglich sein soll. Der eher sozialwissenschaftliche Ansatz des Faktor-10-Modells sieht in der Effizienz infolge technologischer Verbesserungen einen der drei wesentlichen Ansatzpunkte⁵⁰.

Angesichts der zur Zeit betriebenen kapitalintensiven Forschung und Entwicklung kommt der Forschungspolitik eine wichtige Rolle zu, wenn es um die Umsetzung von Innovationen für ein wirksames Stoffstrommanagement geht. Die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages hat sechs Hinweise formuliert, wie technologische Weiterentwicklung die Umsetzung des Stoffstrommanagements wirkungsvoll unterstützen kann⁵¹:

1. Stoffstromrelevante Forschung und Entwicklung muss Abschied nehmen vom Paradigma der absoluten Naturbeherrschung und dem Erarbeiten rein technikorientierter Lösungen.
2. Umweltprobleme können mit rein naturwissenschaftlichen Methoden und Fragestellungen zur Zeit nur bis zu einer gewissen Grenze beschrieben und gelöst werden.
3. Weitere Konkretisierung des Leitbilds, etwa durch
 - Untersuchungen zum Verständnis von Belastbarkeit und Stabilität von Umweltsystemen sowie zum Ressourcenverbrauch,
 - verstärkte Ausrichtung auf die Erhaltung des Realkapitals bei der Entwicklung neuer Werkstoffe, oder
 - Fokussierung auf integrierte Werkstoffforschung, die im Sinne eines produktintegrierten Umweltschutzes stark funktional ausgerichtet ist und Kriterien wie Recyclingfähigkeit, Kreislauffähigkeit und Demontagefähigkeit erfüllt.
4. Förderung integrierter Umweltschutztechnik, da die spezielle Förderung von Umwelttechnik den ökologischen Optimierungsprozess sowie die Anwendung umweltverträglicher Technik beschleunigen kann.
5. Verknüpfung mit anderen Maßnahmen sozioökonomisch-struktureller Art.
6. Neue Strukturen in Forschung und Wissenschaft, die problemorientiert statt diszipliniert ausgerichtet sind.

Die Richtung der technologischen Weiterentwicklung zeigt sich im gesamten Spektrum des Stoffstroms. Einzelnen Abschnitten des Lebensweges von Produkten und Stoffen können dabei technologische Entwicklungsperspektiven zugeordnet werden, die zwar miteinander verknüpft sind und in ihrer Wirkung in einem kausalen Zusammenhang stehen, aber dennoch zur raschen Steigerung der Effizienz parallel angegangen werden können. Einige Beispiele sind im folgenden aufgelistet:

Werkstoff: Technologien zu einem umweltschonenderen Rohstoffabbau, Entwicklung umweltfreundlicher Werkstoffe (verlängerte Lebensdauer, Kennzeichnungsmöglichkeiten, geringe Differenzierung), Verwendung von Sekundärmaterialien

⁵⁰ Beispiele für Ansatzpunkte zur technologischen Effizienzsteigerung aus ausgewählten Bereichen (Energienutzung, Nahrungsmittelproduktion, Textilindustrie) finden sich in Umweltbundesamt (1997)

⁵¹ vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 66 ff).

Produktgestaltung: Rohstoffeinsparung, Reparaturfreundlichkeit, Zerlegefreundlichkeit, Produkte aus wenigen verschiedenen Werkstoffen (Monostruktur), Reduktion von Bauteilen, usw.⁵²

Produktion: Verschnittminimierung, Aufbau eines produktionsintegrierten Recyclingprozesses, Minimierung des Energieverbrauchs und der dissipativen Verluste

Konsumtion: Minimierung diffuser Umweltbelastungen, Nutzungsdauerverlängerung durch Aktivitäten wie Reinigen und Reparieren

Demontage: Shredderanlagen, Sortieranlagen, neue Zerlege- und Trenntechniken, Materialidentifikation, Separierung von Wertstoff- und Schadstofffraktionen

Abfallbehandlung: Kompostierung, Verbrennung, Nachbehandlung, Fraktionierung, Herstellung von nachsorgefreien Reststoffen zur Einlagerung

Neben der Zuordnung technologischer Maßnahmen auf einzelne Abschnitte im Stoffstrom kann eine Unterteilung nach den Fristigkeiten der Wirkung erfolgen. Kurzfristige Lösungen dienen zur Beseitigung akuter Umweltprobleme und wirken meistens isoliert in einem begrenzten Bereich. Diese Ansätze sind beispielsweise End-of-Pipe-Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemission in die Umwelt oder aber Aktivitäten zur Entwicklung eines schadstoffärmeren Produkts, bei dem Art und Volumen des Stoffstroms als auch die Akteurskette unverändert bleiben⁵³. Sie werden auch in Zukunft von Bedeutung sein, eine nachhaltige und dauerhafte Wirkung können sie jedoch nur in Zusammenhang mit umfassenderen Ansätzen entfalten.

Daneben stehen langfristig wirkende Maßnahmen des integrierten Umweltschutzes mit den Zielsetzungen einer Verminderung des dissipativen Einsatzes von Produkten, eines Minder-einsatzes von fossilen Energieträgern, einer Hinwendung zu langlebigen und reparaturfreundlichen Produkten sowie eines verstärkten Einsatz alternativer Energieträger⁵⁴. Kennzeichnend für Maßnahmen des integrierten Umweltschutzes ist eine Veränderung der Art des Stoffstroms und damit auch der Zusammensetzung der Akteure. Häufig setzt die Realisierung von integrierten Umweltschutzmaßnahmen neben veränderten sozialen und ökonomischen Verhaltensweisen eine umfassende Modernisierung bestehender Produktionsprozesse und Anlagen voraus, weswegen die Umsetzung einen langen Zeitraum in Anspruch nimmt.

2.3.3 Einzel- und volkswirtschaftliche Rahmenbedingungen

Eine Umsetzung der mit Stoffstrommanagement verfolgten Ziele vollzieht sich letztendlich innerhalb der bestehenden Wirtschaftsordnung und muss daher die ökonomisch motivierten Entscheidungsgrundlagen der Akteure berücksichtigen, die wesentlich durch gewinnmaximierendes Verhalten und Streben nach Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit begründet werden. Um angesichts der zunehmenden Globalisierung des Wettbewerbs und dem daraus resultierenden Zwang für Marktteilnehmer zu immer schnelleren Innovationen die eher langfristig angelegten Ziele des Stoffstrommanagements realisieren zu können, kommt dem Staat eine entscheidende Rolle bei der Formulierung und Durchsetzung von Rahmenbedingungen für

⁵² vgl. hierzu auch die Anwendung von Gestaltungsanforderungen auf Gipsprodukte in Kapitel 5.2.4

⁵³ vgl. Zundel (1998, S. 213)

⁵⁴ vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 72)

ein stoffstromadäquates Wirtschaften zu. Der Vollzug des Stoffstrommanagements erfolgt jedoch innerhalb der Wirtschaft.

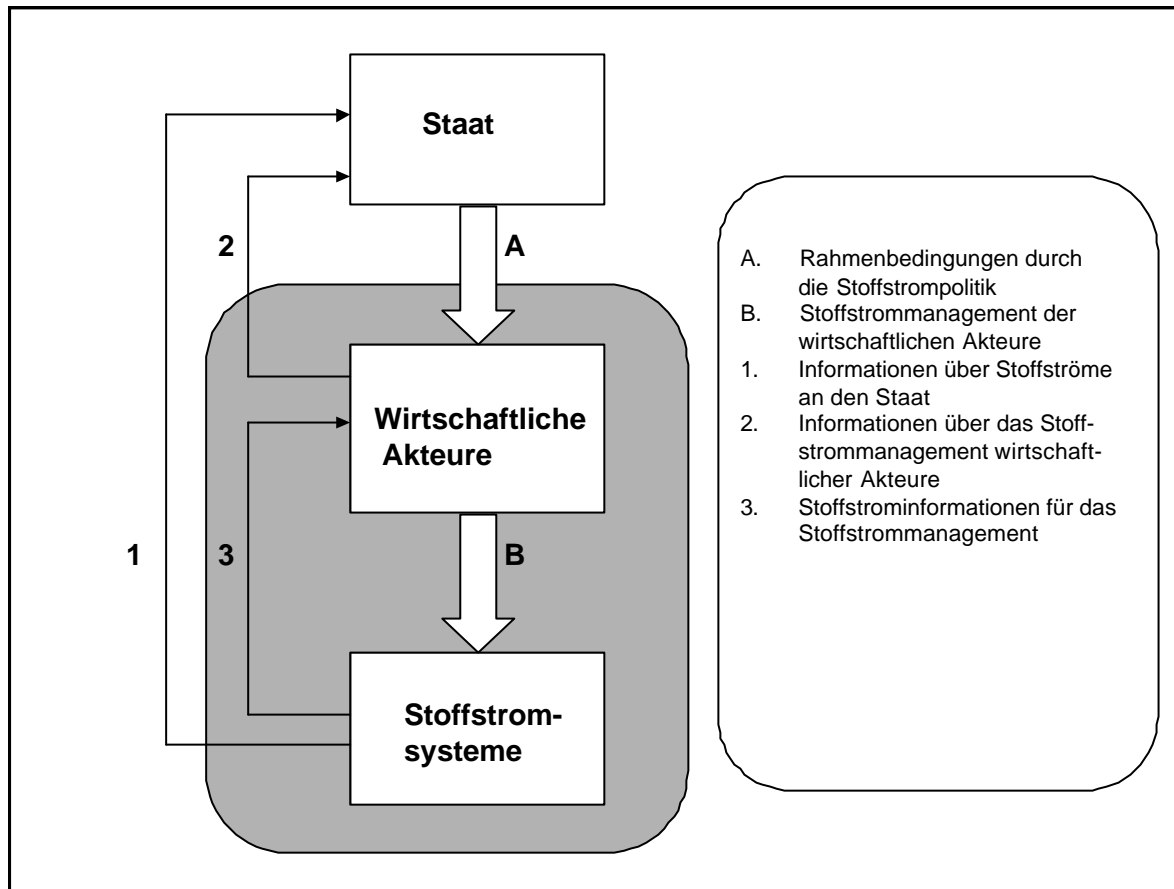


Abbildung 2.3: Die Verteilung der Aufgaben im Stoffstrommanagement⁵⁵

Die Darstellung zeigt nochmals die bereits am Beginn dieses Kapitels angedeutete Reihenfolge bei der Vorgehensweise zur Etablierung von Stoffstrommanagement auf. Zunächst ist der Aufbau einer Informationsbasis erforderlich (1), die als Grundlage für die Formulierung einer Stoffstrompolitik dient (A). Letztendlich vollzieht sich Stoffstrommanagement innerhalb der Wirtschaft (B), unterstützt durch laufende Informationen (3). Dies bedeutet wiederum für den Staat, dass er seine Rahmenbedingungen so gestalten muss, dass die Umsetzung des Stoffstrommanagements in Einklang mit den Rahmenbedingungen des Wirtschaftslebens steht.

Gegenwärtig ist zu beobachten, dass sowohl die ökonomische Theorie als auch die marktwirtschaftliche Praxis im Hinblick auf die Ziele eines nachhaltigen Stoffstrommanagements die falschen Signale setzen. So wird durch die nur ansatzweise Berücksichtigung des Produktionsfaktors „Boden“ die Leistung der Natur bzw. Umwelt nur unzureichend monetär abgebildet erfasst, während auf der anderen Seite der Verbrauch der Natur und dadurch entstehende Schäden, etwa durch die Ausbeutung natürlicher Rohstoffe, als Wachstum deklariert werden⁵⁶. Die Liste der unzureichenden Berücksichtigung „externer Kosten“⁵⁷ zieht sich

⁵⁵ de Man et al. (1997) sowie Henseling (1998, S. 19)

⁵⁶ vgl. van Dieren (1994, S. 12)

⁵⁷ „Externe Kosten treten auf, wenn entweder die Produktion oder der Konsum eines Gutes Dritte in ihrem Vermögen oder in ihrem Wohlbefinden beeinträchtigt, ohne dass sie dafür entschädigt werden. Für externe Kosten muss der Verursacher nicht aufkommen. Sie werden daher auch nicht in die Preise der Produkte eingerechnet“ (Binswanger, 1991, S. 15). Die Behandlung des Begriffs „externer Kosten“ in der Literatur geschieht sehr umfangreich. Insbesondere Anfang der 90er Jahre wurden

entlang des gesamten Stoffstroms durch die Technosphäre: beginnend bei einer zu geringen Berücksichtigung der Knappheit von nicht erneuerbaren Rohstoffen⁵⁸ über die Bereitstellung einer zu billigen Energieversorgung, die im Hinblick auf die Nutzung fossiler Energieträger sogar noch subventioniert wird, eine zu günstig bereitgestellte Verkehrsinfrastruktur bis hin zu Deponiegebühren, die die Knappheit des Abfallraums einerseits und die Knappheit der von ihr absorbierten Ressourcen andererseits nicht adäquat widerspiegeln. So zeigen Faber, Stephan und Michaelis in einer Untersuchung, dass die Lenkungsfunction im Entsorgungsbereich durch zu geringe Entsorgungsgebühren versagt, die nur die Kosten der Deponierung wiedergeben: das rational-ökonomische Verhalten der Akteure (Deponiebetreiber, Abfallverbringer) führt auf der volkswirtschaftlichen Seite zu einer Fehlallokation der Ressource Deponieraum, da dieser zu rasch aufgebraucht wird⁵⁹.

Es muss Aufgabe des Staates sein, die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen der Stoffstrompolitik so zu setzen, dass sie im Einklang mit den Zielsetzungen der Akteure im wirtschaftlichen Umfeld stehen und die Wirtschaftssubjekte zu einem Verhalten motivieren, das Ziele des Stoffstrommanagements in ihren Handlungen mit berücksichtigt. Der Interventions- und Kontrollaufwand, der sich durch ordnungsrechtliche Rahmensetzungen manifestiert, sollte dabei so weit wie möglich zugunsten monetär-fiskalischer Maßnahmen und Anreizsysteme minimiert werden.

2.3.4 Sozio-kulturelle Rahmenbedingungen

Stoffstrommanagement ist eine primär sozialwissenschaftliche Herausforderung, deren Realisierung in entscheidendem Maß von der Beteiligung der Menschen abhängt. Die Gestaltung von Stoffströmen muss sich an die Erfahrungen, Orientierungen und Werthaltungen der Gesellschaft anlehnen und kann daher z.B. zwischen verschiedenen Völkern unterschiedlich ausfallen. Entscheidend ist zunächst, dass ein Leitbild existiert, welches die Zielsetzung als eine Art normatives Postulat formuliert und verdeutlicht, wann und wie gegen das Leitbild verstoßen wird und welche Maßnahmen und Verhaltensregeln zur Erfüllung des Leitbilds erforderlich sind.

Die Kommunikation dieses Leitbilds erfolgt vor dem Hintergrund der bestehenden Wahrnehmung und der daraus abgeleiteten Handlungen in Bezug auf den Umgang mit Stoffen. In den westlichen Ländern ist dabei zu beobachten, dass eine große Sensibilität für Störfälle und außergewöhnliche Skandale herrscht, die Betroffenheit und damit auch die Bereitschaft zu einer Handlung hervorruft⁶⁰. Hingegen ist eher zögerliches Verhalten kennzeichnend, wenn es darum geht, Verhaltensweisen zu ändern, bei denen ein unmittelbarer Erfolg nicht sichtbar wird, oder aber bei denen der Eindruck herrscht, man selbst trete in Vorleistungen, während andere sich hierum keine Gedanken zu machen bräuchten. Der Grad der Ablehnung steigt hierbei in dem Maße an, je unklarer Ziel und Wirkung einer Maßnahme sind. Auch ist zu beobachten, dass es zwar zur sozialen Norm geworden ist, sich positiv über Umweltschutz zu äußern, viele Menschen aber nicht erkennen, wie sie selbst zur Umsetzung beitra-

mehrere Ansätze zur Quantifizierung der externen Kosten vorgenommen, etwa für den Bereich Verkehr oder zur Abschätzung der Schädigung durch den Treibhauseffekt (vgl. z.B. Umweltbundesamt). Weizsäcker schätzte 1992, dass zu den Marktkosten etwa noch 400 % an externen Kosten hinzuaddiert werden müssten (Weizsäcker, 1992, S. 145).

⁵⁸ vgl. hierzu die Arbeit von Valdivia, die zeigt, dass erst bei einer Verzehnfachung bis Verzwanzigfachung der Ausgleichsabgabe für Sand und Kies ein Rückgang der Nachfrage einsetzt (Valdivia, 1995, S. 206). Ebenso sinkt die Nachfrage nach Benzin erst ab einem Benzinpreis von mindestens 4 DM/l.

⁵⁹ vgl. Faber, Stephan, Michaelis (1988). In einer Untersuchung für Baden-Württemberg kommen sie zu dem Schluss, dass zu den geltenden Gebühren von etwa 100-150 DM/t eine Knappheitskomponente von 200-300 DM/t zugeschlagen werden müsste.

gen können⁶¹. Ferner muss bei der Kommunikation des Leitbilds berücksichtigt werden, dass die Akteure ihre Entscheidungen selbstbestimmt und autonom treffen wollen⁶².

Es wird daher eine neue ökologische Bewusstseinsbildung gefordert, durch die die Individuen die Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit des Leitbilds erkennen und akzeptieren, so dass sie zur Partizipation bereit und fähig sind⁶³. Die Förderung dieses ökologischen Bewusstseins könne durch eine verstärkte Vermittlung von Umweltwissen erfolgen, das in die bisherigen pädagogischen Maßnahmen integriert wird.

Demgegenüber reklamieren andere Autoren einen ethischen Diskurs über einen verantwortlichen Umgang mit Stoffströmen⁶⁴. Dabei wird gefordert, dass eine Reflexion des eigenen Handelns in Bezug auf die Ziele des Stoffstrommanagements erfolgt, die letztendlich in einer Abkehr vom bisher praktizierten Wachstumsmodell zur Wohlstandserlangung mündet und statt dessen einen enthaltsamen und bescheidenen Lebensstil vorsieht (Suffizienz Kriterium im Faktor-10-Modell). Korff/Feldhaus postulieren, dass es im wesentlichen darum geht, drei grundlegende Problemstellungen zu bewältigen und auf sie eine ethisch tragfähige Antwort zu finden: Individualverträglichkeit des Handelns im Blick auf die eigenen Entfaltungschancen, Sozialverträglichkeit im Blick auf die Entfaltungschancen anderer sowie Umweltverträglichkeit des Handelns mit Blick auf die natürliche Umwelt⁶⁵. Für Akteure in einer Stoffstromkette, deren unmittelbarer Handlungsradius begrenzt ist, bedeutet diese neue Ethik, ihre individualbezogene einzelwirtschaftliche Maximierung um eine Sichtweise zu ergänzen, die sowohl die Komplexität des gesamten Stoffstroms als auch die Chancen von Kooperationen zwischen einzelnen Akteursbereichen im Sinne einer Win-Win-Strategie im Blick hat.

Aus Sicht des „World Business Council of Sustainable Development“ (WBCSD) werden nur diejenigen Unternehmen die nächsten 30 Jahre überleben, die ihre langfristige Strategie an das Leitbild einer zukunftsfähigen Entwicklungen anpassen und somit die zu erwartenden Änderungen vorwegnehmen anstatt auf diese nur zu reagieren⁶⁶. Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, dass der Impuls zur Etablierung des Leitbilds Stoffstrommanagement zwar vom Staat ausgeht, seine Weiterentwicklung und langfristige Tragfähigkeit jedoch vom Handeln der Akteure in der Wirtschaft abhängt (vgl. Abbildung 2.3).

Die an das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung gestellten Anforderungen aus soziokultureller Sicht werden von der Enquête-Kommission wie folgt zusammengefasst⁶⁷:

- Erhaltung sozialer Gerechtigkeit und sozialer Stabilität
- Achtung individueller Freiheitsrechte bei gleichzeitiger Forderung nach Solidarität
- Verständnis der nachhaltigen Entwicklung als ein Prozess des ständigen Suchens, Lernens und Entscheidens in der Gesellschaft
- Sicherstellung von intergenerationaler Gerechtigkeit

⁶⁰ Das UBA spricht hierbei von „Katastrophenrhetorik“ (Umweltbundesamt, 1997, S. 312)

⁶¹ Enquête-Kommission (1998, S. 369)

⁶² Diese Überlegung geht auf die Aufklärungsphilosophie von Kant zurück und ist ein grundlegendes Wesensprinzip von abendländischen Demokratien. Autonomie setzt ein Subjekt voraus, dass mit der Fähigkeit ausgestattet ist, erstens sein eigenes Handeln von den Ursachen und Wirkungen zu unterscheiden, und zweitens sich und seinem Handeln Normen zu setzen bzw. bestehende Normen anzuerkennen oder abzulehnen. Vgl. Jörrissen et al. (1999, S. 33)

⁶³ vgl. Umweltbundesamt (1997, S. 310)

⁶⁴ vgl. Feldhaus (1998, S. 172); Umweltbundesamt (1997, S. 312). Auch der Begriff der Suffizienz im Faktor-10-Modell ist als ethisch-normatives Konzept zu verstehen.

⁶⁵ vgl. Korff/Feldhaus (1996, S. 32)

⁶⁶ vgl. Jörrissen et al. (1999, S. 30)

⁶⁷ vgl. Enquête-Kommission (1998, S. 41)

- Ablösung materieller Ressourcen durch immaterielle Werte wie Wissen
- Wachstum der sozialen Sicherungssysteme nur in dem Ausmaß, in dem die ökonomische Leistungsfähigkeit zunimmt

2.4 Instrumente für eine Stoffstromgestaltung

Die Instrumente für eine Stoffstromgestaltung sollen die im Leitbild formulierten Ziele unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen in konkrete Maßnahmen umsetzen. Dazu werden die Instrumente in letzter Zeit verstärkt nach ordnungsrechtlichen, ökonomischen und informatorischen Maßnahmen eingeteilt⁶⁸. Es gibt jedoch auch andere Einteilungen, etwa entlang der Stufen des Stoffstroms (Produktion, Konsumtion, Abfallbehandlung)⁶⁹, hinsichtlich der Wirkung der Instrumente auf ökologische, ökonomische und soziale Ziele⁷⁰, oder ausgerichtet am Freiheitsgrad der Akteure⁷¹ oder in der Klassifizierung nach öffentlichen Ausgaben und Einnahmen sowie nicht-zahlungswirksamen Instrumenten⁷². Neben allgemeinen Instrumenten werden in letzter Zeit auch verstärkt sektorale und branchenspezifische Maßnahmen erfasst, die zur Gestaltung besonders wichtiger Stoffströme erforderlich sind⁷³.

Die gewählten Instrumente müssen dabei die allgemeinen Rahmenbedingungen und die speziellen Anforderungen und Problemstellungen eines Stoffstroms berücksichtigen. Hierzu zählen insbesondere⁷⁴

- Einbeziehung aller relevanten Akteure in die Gestaltung des Stoffstroms
- Wahrung des individuellen Handlungsspielraums der beteiligten Akteure
- Sicherstellung der volkswirtschaftlichen Effizienz und Praktikabilität der Maßnahmen bei gleichzeitiger Minimierung von Transaktionskosten
- Sicherstellung des Subsidiaritätsprinzips, wonach die zentral durchzuführenden Maßnahmen auf ein Minimum beschränkt werden sollen
- Wahrung gleicher Zielsetzungen bei unterschiedlichen Stoffströmen

2.4.1 Ordnungsrechtliche Instrumente

Das ordnungsrechtliche Instrumentarium in Form von Geboten und Verboten, aus dessen Bereich gegenwärtig die meisten umweltpolitischen Instrumente stammen, hat seinen Ursprung in der Gefahrenabwehr. Während Gebote eine bestimmte Verhaltensweise wie etwa Kennzeichnungspflicht oder Rückgabepflicht vorschreiben, schließen Verbote bestimmte Verhaltensweisen aus, etwa die Inverkehrbringung von Stoffen. Die Ergreifung ordnungsrechtlicher Maßnahmen ist ausschließlich dem Staat und seinen Organen vorbehalten und äußert sich in der Regel durch die Erlassung von rechtsverbindlichen Gesetzen und Vorschriften. Zur Durchsetzung des Ordnungsrechts ist eine handlungsfähige und durchset-

⁶⁸ Diese Einteilung geht auf die Enquête-Kommission zurück (1994, S. 638 ff.)

⁶⁹ vgl. hierzu SRU (1998, S. 26 ff.)

⁷⁰ vgl. Enquête-Kommission (1998, S. 379 ff.)

⁷¹ vgl. Weizsäcker, Jesinghaus, Mauch (1992, S. 114)

⁷² vgl. Wicke (1993, S. 193)

⁷³ Zu den gegenwärtigen stark diskutierten Stoffströmen gehören Mobilität bzw. Verkehrswesen, Bodennutzung, Energienutzung, Nahrungsmittelproduktion, Bauwesen sowie Textilindustrie. Vgl. hierzu Umweltbundesamt (1998), Friege et al. (1998), Enquête-Kommission (1998)

⁷⁴ vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 636)

zungskräftige Verwaltung bzw. Vollzugsbehörde erforderlich, die bei Verstößen gegen die Vorgaben in der Regel öffentlich-rechtliche Sanktionen verhängen können.

Vorteile des Ordnungsrechts	Nachteile des Ordnungsrechts
Setzt verbindliche Standards	Volkswirtschaftlich suboptimal
Eignet sich zur Schadensabwehr	Hoher Kontroll- und Überwachungsaufwand
Auswirkungen gut kalkulierbar	Häufig nicht dynamisch, da auf einen unspezifizierten Stand der Technik begrenzt
Ist einfach nachzuvollziehen	Erlaubt keine Anreize für Akteure, über das vorgegebene Maß hinaus aktiv zu werden
Stellt auf den ersten Blick Gleichheit zwischen den Marktteilnehmern her	Häufig komplex und nach kurzer Zeit nicht mehr nachvollziehbar
Wirkungen stellen sich schnell ein	Unmittelbarer Markteingriff
	Ökologisch häufig suboptimal, da nur die Erfüllung einer Auflage gefordert wird
	Statt Umweltzielen werden häufig die Mittel zur Erreichung des Ziels vorgeschrieben

Tabelle 2.3: Vor- und Nachteile ordnungsrechtlicher Instrumente

Es gibt hinsichtlich der Einteilung der Vielzahl ordnungsrechtlicher Instrumente verschiedene Klassifizierungen. Sie beziehen sich zum einen auf die Trennung nach stoff- und medien- bzw. anlagenbezogenen Rechtsvorschriften mit den jeweils zugehörigen Rechtskreisen⁷⁵. Zum anderen unterscheidet der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen hinsichtlich des Ansatzes, des Zeitpunkts und der Intensität des staatlichen Eingriffs. Es gibt eine Reihe von Vorschriften im Zusammenhang mit der Aufnahme einer Tätigkeit, ferner Regeln zur Überwachung von laufenden Aktivitäten oder beim Umgang mit Abfallprodukten⁷⁶.

Beispiele für ordnungsrechtliche Instrumente sind:

- Genehmigungs- und Zulassungsverfahren (anlagenbezogen)
- Vorschriften zur Immissionsbegrenzung im laufenden Betrieb (anlagenbezogen)
- Dokumentationspflicht, wie etwa Stoffbuchhaltungen, Deklarierungen, Kennzeichnungen oder Offenlegungspflichten
- Stoffverbote hinsichtlich Verwendung, Inverkehrbringung oder Handel (auch Export)
- Deponierungsrichtlinien, -beschränkungen und -verordnungen
- Abfallbehandlungsvorschriften und Verwertungsvorschriften (geregelt z.B. im KrW-/AbfG)
- Rücknahmequoten, Rücknahmepflichten, Rückgabepflichten⁷⁷
- Festlegung der Haftung entlang einzelner Stufen des Produkt- bzw. Stoffzyklus

⁷⁵ vgl. Ewers und Brenck (1994, S. 1)

⁷⁶ vgl. SRU (1994, Tz. 297)

⁷⁷ Während Rücknahmepflichten dem Hersteller, Inverkehrbringer oder einem Dritten auferlegt werden, gelten Rückgabepflichten für Abfallerzeuger.

- Vorgabe von Produkt- oder Verfahrenstandards
- Vergabe und Beschränkung von Nutzungsrechten (z.B. bei der Gewinnung von Rohstoffen)

Das Haftungsrecht ist eines der umfassendsten Möglichkeiten zur Steuerung von Stoffströmen. Wird die Haftung im Schadensfall auf den Produzenten verlagert, und der Geschädigte hat seine Sorgfaltspflicht nicht verletzt (Gefährdungshaftung), entsteht beim Produzenten ein Anreiz zur Ergreifung vorsorglicher Maßnahmen zur Minimierung späterer Haftungsrisiken. Auch wird hierdurch der bewusstere Umgang mit Stoffen und ihren Wirkungen bereits in der Entwicklungs- und Produktionsphase gefördert⁷⁸.

Den Vorteilen des Ordnungsrechts, die sich insbesondere in der unmittelbaren Ursache-Wirkungs-Beziehung äußern, stehen eine Reihe von Nachteilen gegenüber, die insbesondere die volkswirtschaftliche Ineffizienz (hohe Vollzugs- und Überwachungskosten, nur suboptimale gesamtwirtschaftliche Ressourcenallokation) und die Komplexität der Verordnungen betreffen, die sich häufig widersprechen und nicht kongruent zueinander sind. Zur Zeit wird an der Formulierung eines neuen Umweltrechts gearbeitet, das die unterschiedlichen Vorschriften, Gesetze und Verordnungen bündeln soll, die in verschiedenen Rechtskreisen angesiedelt sind. Das Vorhaben erweist sich jedoch als äußerst schwierig, da sowohl Schwierigkeiten hinsichtlich der Vereinheitlichung medienübergreifender Vorschriften als auch hinsichtlich der Interpretation von Sachverhalten bestehen. Ferner sind Probleme der Abgrenzung von Zuständigkeiten zu klären⁷⁹.

2.4.2 Ökonomische Instrumente

Ziel von ökonomischen Instrumenten ist es, die „Knappheit von (staatlich definierten) Umweltspielräumen preiswirksam werden zu lassen, um hierdurch eine ökonomisch effizientere Koordination der Nachfrage nach diesen Umweltnutzungsspielräumen und ihrem Angebot herbeizuführen“⁸⁰. Die Realisierung von ökonomischen Instrumenten geschieht in der Regel durch direkte finanzwirksame Transaktionen wie etwa Steuern und Abgaben, aber auch Vergütungen und Vergünstigungen. Das Ziel ökonomischer Instrumente ist die dauerhafte Motivierung der Marktteilnehmer zu einem umweltorientierten Verhalten, unter Berücksichtigung der dynamischen Entwicklung des Marktes und der Technik. Ökonomische Instrumente basieren auf der Idee einer Mengensteuerung, bei der der Umfang der Nutzung einer Ressource vom Staat im Voraus festgelegt wird⁸¹. Durch die Instrumente soll eine volkswirtschaftlich effiziente Aufteilung erreicht werden.

Ökonomische Instrumente werden als effizientes Mittel zur Übermittlung von Informationen gesehen: sind die notwendigen Bedingungen für ein Funktionieren des Marktes gegeben (vollständige Konkurrenz, keine externen Effekte), dann übermittelt der Preis sämtliche Informationen, da durch die Bezahlung des Marktpreises für eine Ressource oder ein Gut der Nutzer Dritte für die damit verbundenen Folgen entschädigt. Die notwendigen Bedingungen sind in der Realität jedoch nicht vorhanden, da ein Großteil der nutzungsbedingten Kosten, die sich aufgrund der Knappheit der Produktionsfaktoren sowie der Knappheit der ökologi-

⁷⁸ In der Literatur ist nicht eindeutig geklärt, ob das Haftungsrecht den ordnungspolitischen oder den ökonomischen Instrumenten zugerechnet werden soll. Grundsätzlich erscheint es naheliegender, alle Arten von Rechtsvorschriften den ordnungsrechtlichen Instrumenten zuzurechnen, auch wenn sie nicht unmittelbar die Nutzung von Stoffen oder Anlagen regeln und, wie im Falle des Haftungsrechts, eine dauernde Motivation zur Verhaltensänderung für die Akteure bieten.

⁷⁹ vgl. hierzu Umweltbundesamt (1997, S. 287)

⁸⁰ Enquête-Kommission (1994, S. 654)

schen Senken, Gütern und Dienstleistungen ergeben, von Dritten (z.B. zukünftige Generationen) getragen werden müssen⁸². Zur Internalisierung dieser „externen Kosten“ sollen umweltökonomische Instrumente herangezogen werden⁸³.

Zur Mengensteuerung stehen grundsätzlich die beiden Instrumente Zertifikate und Abgaben zur Verfügung. Zu den **Abgaben** werden Steuern, Gebühren, Beiträge, aber auch, mit negativem Vorzeichen, direkte Subventionen und Steuervorteile gezählt. Ihrem Wesen nach wird ein fester Satz je Mengeneinheit vorgegeben, der entrichtet oder vergütet werden muss. Dem Ansatzpunkt nach lassen sich Umweltabgaben in Produkt-, Verfahrens-, Emissions- und Immissionsabgaben einteilen, hinsichtlich ihres Ziels wird nach außerfiskalischen (Lenkungsabgaben mit dem Ziel der Reduktion von Mengen) oder fiskalischen (Ziel ist die Erzielung öffentlicher Finanzmittel) Funktionen unterschieden. Die Abgaben, solange es sich nicht um Steuern handelt, haben den Vorteil, dass mit ihnen in der Regel eine direkte Verbindung zu einem außerfiskalischen Ziel hergestellt werden kann; allerdings ist die Existenz eines derartigen Ziels auch Bedingung für einen sinnvollen Einsatz. Hierzu zählen etwa Ressourcenverbrauchsabgaben⁸⁴, Abfallabgaben⁸⁵ und zusätzlich erhöhte Deponierungsgebühren, ebenso wie direkte finanzielle Zuwendungen etwa über Vorzugszinsen oder Fördermittel im Bereich Forschung und Entwicklung. Der große Nachteil von Abgaben ist die Ungewissheit, ob ihre Höhe angemessen ist und dem formulierten Ziel tatsächlich dient, ohne die Rahmenbedingungen des Marktes zu verletzen (z.B. Wettbewerbsnachteil)⁸⁶. So wird davon gesprochen, dass die Ressourcenökonomie bislang nicht in der Lage war, die Knappheit adäquat in den Marktpreisen abzubilden⁸⁷.

Zertifikate dienen dazu, ein vorher vom Staat festgelegtes Gesamtkontingent in handelbare Umwelnutzungsrechte aufzuteilen und anschließend den Handel mit diesen Rechten dem Markt für Zertifikate zu überlassen. Ihr größter Vorteil ist, dass das umweltpolitische Ziel einer Mengenbegrenzung direkt zum Gegenstand der Entscheidung gemacht wird. Der Staat braucht, da er kein aktiver Teilnehmer am Zertifikatshandel ist, im Gegensatz zu Abgaben keine Rechtfertigung mehr über Umfang und Höhe der umweltpolitischen Maßnahmen zu führen⁸⁸. Außerdem ist im Rahmen der Erstemission von Zertifikaten ein Bezug zur Verteilungsdebatte hergestellt. Nachteile der Zertifikate sind ihre dynamische Ineffizienz, da eine einmal festgelegte Menge auch ausgeschöpft wird; ferner die schlechte Steuerbarkeit von anderen, zumeist sozialen Problemen, die im Rahmen der Einführung einer Zertifikatslösung anfallen, sowie die geringen Einsatzmöglichkeiten aufgrund der geringen Größe vieler Märkte. Auch ist das Konzept den wirtschaftlichen Akteuren bislang noch nicht vertraut. Nach Ansicht der Enquête-Kommission eignen sich Zertifikate „grundsätzlich für Ressourcen und für solche Stoffe, die durch den Eintrag eher großer Mengen eher zeitverzögert und eher global wirken“⁸⁹.

⁸¹ Dies gilt jedoch nur dann, wenn das Haftungsrecht den ordnungsrechtlichen Instrumenten zugerechnet wird.

⁸² vgl. Meyerhoff, Petschow (1998, S. 129)

⁸³ Im theoretischen Idealfall wird die Höhe der externen Kosten durch eine Abgabe kompensiert, der sogenannten „Pigou-Steuer“. Die Informations- und Bewertungsprobleme sind jedoch in der Praxis weder von einem „willingness-to-pay“-Ansatz noch von einem Vermeidungskostenansatz zu bewältigen (vgl. Jörissen et al., 1999, S. 139)

⁸⁴ vgl. Valdivia (1995)

⁸⁵ vgl. Faber, Stephan, Michaelis (1988), die als Abfallabgabe 200-260 DM/t ermitteln

⁸⁶ Zu den Abgaben zählt auch die ökologische Steuerreform. Dem Wesen einer Steuer nach wird sie nicht zweckgebunden entrichtet und dient damit eher einem fiskalischen Zweck. Zu einer Erläuterung der Überlegungen der ökologischen Steuerreform vgl. Umweltbundesamt (1997, S. 288 ff.) sowie Enquête-Kommission (1994, S. 656 ff.)

⁸⁷ vgl. Henseling (1998, S. 21)

⁸⁸ vgl. Meyerhoff, Petschow (1998, S. 135)

⁸⁹ Enquête-Kommission (1994, S. 660)

Ein weiteres ökonomisches Instrument sind **Pfandsysteme**, bei dem ein Inverkehrbringer von Stoffen und Produkten eine Abgabe hinterlegen muss, die bei Erfüllung von Bedingungen später, etwa nach Ablauf der Produktlebensdauer oder bei Erfüllung eines bestimmten Umweltziels, zurückgezahlt wird. Besonders vorteilhaft erweisen sich Pfandsysteme für überwachungsbedürftige Stoffe, bei denen das Ziel einer ordnungsgemäßen Entsorgung, möglichst getrennt von anderen Stoffen, eine große Priorität besitzt (z.B. Batterien). Ferner eignen sie sich für diffuse Stoffquellen, wenn eine sortenreine Erfassung von Stoffen erreicht werden soll. Hingegen gelten Pfandsysteme als ökologisch und ökonomisch ineffizient, da sie mit hohen Transaktionskosten verbunden sind. Ferner ist bei längerlebigen Gütern wie etwa im Baubereich der kausale Zusammenhang zwischen Beschaffung und Entsorgung nicht mehr erkennbar.

Vorteile umweltökonomischer Instrumente	Nachteile umweltökonomischer Instrumente
Ist in der Regel dynamisch, da es die Akteure immer wieder zu Handlungen motiviert	Die Lenkungsabsicht ist oft nicht erkennbar
Passt sich den Rahmenbedingungen des Wirtschaftslebens an	Die Wirkung ist häufig nicht vorhersehbar
Motiviert die Akteure zu Innovationen	Die Höhe von Abgaben ist oft nicht zu begründen, ebenso die Gesamtmenge bei Zertifikaten
Ist fair gegenüber allen Marktteilnehmern, da der Ausgleich über den Preis erfolgt	Eignet sich nur für die Steuerung großer Stoffströme mit langen Zeithorizonten
Volkswirtschaftlich effiziente Lösung mit minimalen Transaktionskosten (Abgaben, Zertifikate)	Akteure verfügen über zu geringe Informationen, um Lenkungsabsicht zu realisieren

Tabelle 2.4: Vor- und Nachteile ökonomischer Instrumente

2.4.3 Informatorische und freiwillige Instrumente

Da Stoffstrommanagement als sozialwissenschaftliche Herausforderung auf die Kooperation der Akteure zielt, kommt den informatorischen Instrumenten zur Vermittlung von Kenntnissen über Rollen, Beziehungen und Sachverhalten im Stoffstrom eine wesentliche Bedeutung zu. Die Enquête-Kommission versteht darunter „die Maßnahmen, die ein aktives Verhalten in Richtung eines vorbeugenden Umweltschutzes fördern, ohne dass dies gesetzlich vorgeschrieben ist“⁹⁰. In einer groben Klassifizierung können diese Instrumente in solche eingeteilt werden, die das Wissen über Stoffströme erweitern, die die Kooperation zwischen Akteuren im Stoffstrom fördern sowie diejenigen, die innerhalb eines Unternehmens wirksam werden.

Zu den Maßnahmen, die das Wissen über Stoffströme erweitern, zählen:

- Verbraucherinformationen über die Umweltauswirkungen von Stoffen und Produkten sowie über die Umweltaktivitäten von Unternehmen
- Aufbau einer umweltökonomischen Gesamtrechnung als Komplement zur volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung

⁹⁰ Enquête-Kommission (1994, S. 667)

- Aufbau und Kommunikation eines betrieblichen Stoffbuchhaltungssystems
- Erweiterung der Fort- und Weiterbildungsmöglichkeiten über Umweltziele sowie Einrichtung öffentlicher Diskussionsforen
- Anpassung von Berufsausbildungsinhalten mit umweltrelevanten Sachverhalten

Zur Vertiefung der Kooperation zwischen Akteuren eignen sich folgende Instrumente:

- Freiwillige Vereinbarungen zwischen Staat und Unternehmen, zwischen Unternehmen einer Wertschöpfungskette (vertikale Kooperation) oder innerhalb von Verbänden (horizontale Kooperation) im Sinne von Selbstverpflichtungen⁹¹. In diesen Selbstverpflichtungen werden in der Regel Zielsetzungen und Absichtserklärungen ohne konkrete Maßnahmen formuliert
- Kooperationen zwischen Unternehmen und Anwohnern mit dem Ziel, gegenseitig Vertrauen aufzubauen
- Ausbau der internationalen Umweltzusammenarbeit, sowohl auf der Ebene staatlicher Akteure als auch auf einzelwirtschaftlicher Ebene
- Vertikale Kooperationen zwischen Akteuren entlang eines Stoffstroms wie z.B. Architekten, Baustoffhersteller, Handwerker und Unternehmen der Baurestmassenbehandlung
- Normierung von Produkten mit dem Ziel der Formulierung ökologischer Mindeststandards oder der Mindestanforderungen für die Verwendung von Sekundärmaterial⁹². Dies erfolgt häufig über ein gemeinsam getragenes Markenzeichen wie etwa „Blauer Umweltengel“)

Innerhalb eines Unternehmens dienen folgende Aktivitäten der Unterstützung bei der Umsetzung umweltpolitischer Zielsetzungen:

- Einführung eines Umweltmanagementsystems, entweder nach der Öko-Audit-Verordnung oder nach der Norm ISO 14001
- Aufbau eines internen Umweltberichtssystems, dessen Inhalte zum Teil auch in die Öffentlichkeit kommuniziert werden können
- Einsatz von Ökobilanzen zur internen Optimierung von Abläufen und zum unternehmensübergreifenden Produktvergleich
- Ausbau des Öko-Marketing, etwa begleitet durch verlängerte Garantiefrieten oder neuen Nutzungskonzepten (z.B. Leasing)

Es besteht weitgehend Übereinstimmung, dass die informatorisch-freiwilligen Instrumente einen wichtigen Beitrag bei der Umsetzung der Leitbilder des Stoffstrommanagements leisten⁹³. Durch sie wird es möglich, die Komplexität der Herausforderung Stoffstrommanagement auf die Ebene der Entscheidungs- und Wissensträger zu verlagern und somit eine Dezentralisierung zu erreichen, die mittelfristig so weit gehen soll, dass Impulse zu innovativem,

⁹¹ Eine derartige Selbstverpflichtung ist z.B. der Kreislaufwirtschaftsträger Bau eingegangen, der 1996 freiwillig eine Verwertungsquote von 60 % der anfallenden Baurestmassen als Ziel für das Jahr 2005 formuliert hat.

⁹² Das Problem der Verwendbarkeit von Sekundärmaterial ist gerade im Baubereich mit seinen vielen heterogenen Stoffen sehr bedeutsam. Neben den bereits existierenden Regeln zur Verwendung von Sekundärmaterial im Straßenbau sind Bestimmungen über den Einsatz z.B. als Betonzuschlag im Hochbau dringend erforderlich, um die Verwertungsquote zu steigern.

⁹³ vgl. z.B. Enquête-Kommission (1998, S. 380), SRU (1998, S. 22), Enquête-Kommission (1994, S. 668), Umweltbundesamt (1997, S. 247), Meyerhoff/Petschow (1998, S. 138 ff.), Gießhammer/Buchert (1996, S. 5)

umweltorientiertem Handeln von den Akteuren selbst und nicht mehr, wie zur Zeit noch verbreitet, vom Staat ausgehen.

Vorteile informatorischer Instrumente	Nachteile informatorischer Instrumente
Durch die Dezentralisierung auf die Ebene der Entscheider wird die Komplexität des Stoffstrommanagements beherrschbarer	Die Wirkung in Bezug auf die Zielerreichung ist nur indirekt, da mit informatorischen Maßnahmen eine Motivation zu umweltgerechtem Verhalten angestrebt wird
Akteure bewerten selbständig Chancen und Risiken informatorischer Instrumente	Informatorische Instrumente können nur begleitend eingesetzt werden
Die Aktivitäten erfolgen freiwillig, weswegen die Akteure motivierter sind	Keine Sanktionsmechanismen für Nicht-Anwendung vorhanden
Dienen als Grundlage für die Umsetzung eines ethischen Konsenses	Schwierigkeiten, übergeordnete Ziele und Standards zu vermitteln

Tabelle 2.5: Vor- und Nachteile informatorischer Instrumente

2.5 Zusammenfassung und Extraktion der theoretischen Ansätze im Hinblick auf den Untersuchungsgegenstand

Formulierung einer Zielsetzung und Konsens mit den Akteuren

Zur Realisierung eines Stoffstrommanagements ist es zunächst unabdingbar, dass seitens der Umweltpolitik eine klare Zielsetzung mit einer entsprechenden Prioritätensetzung formuliert wird. Hierzu gehört auch, dass es erklärtes Ziel ist, zur Umsetzung der Ziele alle Akteure, die entlang des Stoffstroms als Entscheidungsträger wirken, zu beteiligen und mit ihnen gemeinsam einen Konsens über die Gewichtung der Zielsetzung in ökologischer, ökonomischer und sozialer Perspektive herzustellen und sich über Notwendigkeit, Ausmaß und zeitlichen Horizont der Umsetzung zu verständigen.

Informationen über den Zustand des Systems

Es gilt, die beteiligten Akteure im System zu identifizieren und Informationen über den Ist-Zustand des Systems, die quantitative und qualitative Darstellung von Stofflagern und Stoffflüssen, die Aufgaben und Rollen der Beteiligten am Stoffstrom sowie ihre Beziehungen untereinander zu vermitteln. Dies beinhaltet auch den Aufbau von Datenbanken und Verfahren zum regelmäßigen Informationsaustausch zwischen relevanten Akteuren. Im Stoffstrom Gips sind dies die Anbieter von Rohstoffen (Naturgipsabbauer, REA-Gips-Erzeuger, Bauschuttrecycler), die Hersteller von Gipsprodukten (Gipsindustrie), die Verwender von Gipsprodukten (Bauindustrie, Handwerker, Handel), der Staat, der Industrieverband Gips sowie begleitende Akteure wie Architektenverbände.

Ordnungsrechtliche Beschränkung identifizierter Gefährdungen

Akute Schwachstellen im Stoffstrom, die sich aufgrund der Analyse und Information ergeben haben, lassen sich am wirkungsvollsten durch ordnungsrechtliche Gebote oder Verbote beseitigen. Im Stoffstrom Gips gibt es zunächst keine derartige Notwendigkeit zur unmittelbaren Handlung.

Verständigung über konkrete Ziele

Ausgehend von einem gemeinsamen Verständnis über die prognostizierte Entwicklung in den nächsten Jahren und Jahrzehnten, die z.B. mit Hilfe von Szenarien erstellt werden können, werden mittelfristige Zielsetzungen abgeleitet, die sowohl technologische als auch logistische und marktliche Maßnahmen beinhalten und ökologische, ökonomische und soziale Belange berücksichtigen. Im Stoffstrom Gips betreffen diese Zielsetzungen vor allem die verstärkte Ausnutzung des Potenzials des Baustoffrecycling auf Grundlage der bereits im Stofflager befindlichen Mengen, die langfristige Planung des Abbaus von Naturgips unter Berücksichtigung der ökonomischen und sozialen Aspekte des Strukturwandels sowie die Formulierung und verbindliche Festsetzung von Standards für eine umweltgerechte Konstruktion von Gipsprodukten. Begleitend dazu empfiehlt sich der Aufbau einer Stoffbuchhaltung.

Anwendung ökonomischer und ordnungsrechtlicher Instrumente zur Förderung der Zielerreichung

Der Staat kann nach erfolgter Verständigung über mittelfristige Ziele Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele unterstützen bzw. ein System einführen, das nicht zielgerichtetes Verhalten schlechter stellt. Neben der Förderung zur technologischen Entwicklung von Verfahren zur Verbesserung des Baustoffrecyclings kommt im Stoffstrom Gips eine preisliche Differenzierung für Gips in Abhängigkeit seiner Herkunft in Frage (z.B. sukzessive steigende Rohstoffabgabe für Naturgips), ebenso wie eine Verschärfung der Annahmebedingungen für zu deponierenden gipshaltigen Bauschutt.

Information der Reduktionswirtschaft über zukünftige Entwicklungen

Ausgehend von der Bestimmung zukünftiger Abfallmengen und der Beschreibung ihrer qualitativen Zusammensetzung mit Hilfe des Dispersionsgrads braucht die Reduktionswirtschaft regelmäßige Informationen über Maßnahmen des Stoffstrommanagements sowie über sich verändernde Mengen und Qualitäten des Abfalls. Andererseits kann die Reduktionswirtschaft ihrerseits durch rational-ökonomisches Verhalten einen geeigneten Beitrag zur Stimulierung stoffstrompolitischer Maßnahmen leisten.

3. STOFFSTRÖME IM BAUBEREICH

Der Baubereich ist derjenige Sektor der Technosphäre, in dem ein großer Teil der Stoffströme bewegt wird und ein riesiges Lager an Materialien gespeichert ist⁹⁴. Während Konzepte für ein Stoffstrommanagement in der Regel vom Produzierenden Gewerbe und der Analyse und Bewertung eines neuen Stoffeinsatzes ausgehen, weist der Baubereich einige besondere Phänomene auf:

- Die riesigen Mengen, die sowohl bei der Produktion als auch in der Abfallwirtschaft bewegt werden, und deren Verwertung häufig durch geringe Mengen von Problem- und Schadstoffen beeinträchtigt wird.
- Der Stoffeinsatz ist, bezogen auf den damit erzielten Nettoproduktionswert, um den Faktor 3 höher als in der Eisen- und Metallindustrie sowie um den Faktor 7 höher als in der Chemieindustrie⁹⁵.
- Der durch das Bedürfnisfeld Bauen hervorgerufene Energieverbrauch, insbesondere die Konsumemissionen⁹⁶, spielen eine bedeutende Rolle. Daneben ist bei der Planung zukünftiger Strategien der Flächenverbrauch durch das Bauwesen zu berücksichtigen.
- Bislang war es weit verbreitete Praxis, Bauschutt und Baustellenabfälle als „hausmüll-ähnlichen Gewerbeabfall“ oder in unbekannten Senken wie Baugruben zu entsorgen. Dadurch ist die Datenlage über das Ausmaß der Stoffströme extrem verzerrt und lückenhaft.
- Die Trägheit des Systems Gebäudebestand, das einerseits die Auseinandersetzung mit bereits lang zurück liegenden Fehlentwicklungen erfordert, andererseits aber die Wirkung von Maßnahmen erst in langen Zeiträumen sichtbar macht.
- Die Unterschiedlichkeit der Baustoffe, die sich sowohl hinsichtlich ihrer Lebensdauer als auch ihrer Rezepturen stark unterscheiden. Gerade in den letzten 30 Jahren wurden Bauprodukte gezielt zur Erfüllung bestimmter Funktionen verändert.
- Durch die Vielfalt der in der Bauwirtschaft tätigen Akteure müssen Maßnahmen häufig an mehreren Stellen gleichzeitig ansetzen. Einher geht damit das geringe Verantwortungsbewusstsein der Beteiligten entlang des Stoffstroms.
- Die rechtliche Situation ist von einer Reihe von über- und untergeordneten Gesetzen geregelt, sowohl aus dem Bau- als auch aus dem Umweltrecht.

Aspekte dieser Besonderheiten im Baubereich werden in den nachfolgenden Unterabschnitten diskutiert. Vorher erfolgt eine kurze Begriffsbestimmung und Erläuterung von Klassifizierungen im Baubereich.

⁹⁴ Sowohl bei der Erstellung von Bauwerken als auch in der Abfallwirtschaft entfallen rund 50 –70 % der gesamten Stoffflüsse auf den Baubereich. Das Lager an Materialien im Bauwesen wird allein im Hochbau in Deutschland auf rd. 10 Mrd. t geschätzt (ITAS/ifib, 1998, S. 52) entsprechend 125 t / Einwohner. Hinzu kommen etwa 200-250 t / Einwohner im Tiefbau (Zahlen gem. Glenck et al., 1996, S. 90), wodurch sich ein Gesamtlager im Baubereich in Deutschland von etwa 25 Mrd. t ergibt.

⁹⁵ vgl. Lahner (1994, S. 10)

⁹⁶ vgl. Glenck et al. (1997, S. 1)

3.1 Gliederung und Begriffe im Baubereich

Der Baubereich umfasst alle Aktivitäten, Produkte und Stoffe, die im Zusammenhang mit der Erstellung, Nutzung und Entsorgung von Bauwerken⁹⁷ anfallen. Hierzu gehören die Herstellung und der Transport von Baumaterialien, der Vorgang der Planung und Erstellung von Gebäuden, die Nutzung, die Instandhaltung sowie die Entsorgung von Gebäuden, Gebäudeteilen sowie Infrastrukturnetzen⁹⁸. Mögliche Einteilungen des Baubereichs sind:

- Unterteilung nach Hochbau (Dauerhafte Gebäude, deren Hauptteil über dem Erdboden liegt) und Tiefbau (zu ebener Erde oder unter dem Erdboden liegend).

Hochbau	Wohnbau	Einfamilienhäuser Reihenhäuser Mehrfamilienhäuser Hochhäuser
	Nicht-Wohnbau	Büro- und Verwaltungsgebäude Anstaltsgebäude Hotels und Gaststätten Handels- und Lagergebäude Fabrik- und Werkstattgebäude Landwirtschaftsgebäude Sonstige Gebäude
Tiefbau	Straßenbau	Autostraßen Forststraßen Radwege Brücken
	Schienenbau	Eisenbahn Straßenbahn
	Wasserversorgungsbau	Wasserleitungen Wasserbehälter
	Abwasserentsorgungsbau	Kanäle Kläranlagen
	Sonstiger Netzwerksbau	Fernwärmeleitungen Gasleitungen Stromleitungen Telefonleitungen

Tabelle 3.1: Gliederung des Bauwesens nach Bausparten⁹⁹

- Unterteilung nach Neubau (erstmalige Herstellung von Bauwerken), Ausbau (Veränderung bestehender Bauten), bauliche Erhaltung (Pflege, Instandsetzung, Erneuerung mit dem Ziel der Gebrauchswerterhaltung für den Nutzer) sowie Abbruch von Bauwerken

⁹⁷ „Bauwerke sind mit dem Erdboden verbundene Sachen, die aus Baustoffen und Bauteilen hergestellt und/oder für die Bauleistungen erbracht werden“ (Statistisches Bundesamt 1978, S. 8)

⁹⁸ vgl. ITAS/ifib (1998, S. 25)

⁹⁹ vgl. ITAS/ifib (1995, S. 27) sowie Glenck et al. (1996, S. 11)

- Unterteilung nach den im Bauwesen tätigen Branchen, eingeteilt in Bauhauptgewerbe und Ausbaugewerbe. Daneben gibt es noch eine Reihe von Branchen, die im Bereich der Vorleistungen (Baustoffhersteller) oder in Dienstleistungsfunktionen tätig sind (Baustoffhandel, Transportunternehmen)

Bauhauptgewerbe	Hochbau	Fertigteilmontage im Hochbau (Herstellung und Montage von Fertigbauteilen aus Beton oder Holz)
	Tiefbau	Erdbewegungsarbeiten Landeskulturbau Wasser- und Wasserspezialbau Straßenbau Brunnenbau Bergbauliche Tiefbohrung Schachtbau
	Gerüstbau Fassadenreinigung	
	Spezialbau	Schornstein- u. Feuerungsbau Gebäudetrocknung Abdämmung gegen Kälte, Wärme, Schall und Erschütterung Abbruch-, Spreng- und Enttrümmungsgewerbe
	Stukkateurgewerbe, Gipserei	
	Zimmerei, Dachdeckerei	
Ausbaugewerbe	Bauinstallation	Klempnerei Gas- und Wasserinstallation Installation von Heizung, Lüftung und Klima Elektroinstallation
	Bautischlerei Parkettlegerei	
	Fußboden-, Fliesen- und Plattenlegerei	
	Sonstiges Ausbaugewerbe	

Tabelle 3.2: Gliederung des Baugewerbes¹⁰⁰

Unter einem Baustoff wird im allgemeinen Sprachgebrauch „ein Sammelbegriff für Stoffe zur Erzeugung und Fertigung von Bauteilen und Bauwerken“ verstanden¹⁰¹, die sich in die Kategorien metallische, organische, mineralische sowie nichtmetallisch-anorganische Baustoffe

¹⁰⁰ Systematik nach Statistisches Bundesamt (1987)

¹⁰¹ Duden-Definition

einteilen lassen. Hiervon abweichend bezeichnet das Chemikaliengesetz Stoffe als „chemische Elemente oder chemische Verbindungen, wie sie natürlich vorkommen oder hergestellt werden, einschließlich der Verunreinigungen und der für die Vermarktung erforderlichen Hilfsstoffe“¹⁰². Ein Großteil der im allgemeinen Sprachgebrauch als Baustoffe bezeichneten Güter fällt laut Chemikaliengesetz unter den Begriff des Erzeugnisses: „Stoffe oder Zubereitungen, die bei der Herstellung eine spezifische Gestalt, Oberfläche oder Form erhalten haben, die deren Funktion mehr bestimmen als ihre chemische Zusammensetzung“¹⁰³. Der Stoffbegriff gemäß Chemikaliengesetz ist sehr einengend, da er nur auf natürlich vorkommende oder hergestellte Elemente abhebt. Unter Baustoff sollen daher alle Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse verstanden werden, unter Einbeziehung von Vorprodukten (Sekundärrohstoffen), Abfällen und Reststoffen¹⁰⁴. Gips, unabhängig von seiner Herkunft, ist nach dieser Definition ein Baustoff.

Die Bauproduktenrichtlinie der EG versteht unter Bauprodukt jedes Produkt, „das hergestellt wird, um dauerhaft in Bauwerken des Hoch- oder Tiefbaus eingebaut zu werden“¹⁰⁵. Diese Definition ist insofern einschränkend, als dass sie Hilfsstoffe im Bauwesen nicht berücksichtigt, die nicht dauerhaft ins Bauwerk eingehen. Als Bauprodukt werden daher alle Stoffe und Verbindungen verstanden, die zum Zwecke der Erfüllung einer bestimmten Funktion hergestellt und vermarktet werden. Hierunter fällt etwa eine Gipskartonplatte. Der weiterhin gebräuchliche Begriff Bauteil (aus Bauelementen¹⁰⁶ bestehende Einheit mit tragenden und/oder raumteilender oder raumerschließender Funktion)¹⁰⁷ wird im folgenden synonym zu Bauprodukt verwendet.

3.2 Das Mengenproblem

Die durch die Aktivitäten im Baubereich verursachten Massenbewegungen stellen neben den Flüssen an Wasser und Luft den mit Abstand größten Anteil der in der Technosphäre auftretenden Stoffströme dar. So entfallen zwar rund 75 % des gesamten Stoffumsatzes auf Wasser und weitere 15 % auf Luft zur Umwandlung von Energie, jedoch werden diese „Güter“¹⁰⁸ unmittelbar nach ihrem Gebrauch wieder aus der Technosphäre ausgeschleust und stellen somit einen Durchfluss dar. In einer Untersuchung der Güter- und Stoffflüsse von Wien kommen Brunner et al. auf einen jährlichen Güterinput in die Technosphäre von etwa 300 Mio. t, von dem etwa 225 Mio. t auf den Wasserdurchsatz, etwa 42 Mio. t auf Luft zur Umwandlung der Energieträger, 3 Mio. t auf Energieträger, 17 Mio. t auf Produktions- und Konsumgüter sowie 10-20 Mio. t auf Baumaterialien entfallen¹⁰⁹. Daraus ergibt sich ein spezifischer jährlicher Pro-Kopf-Input von etwa 11 t an Produktions- und Konsumgütern sowie 5-15 t an Baumaterialien, eine Größenordnung, in der auch die für Deutschland aufgestellte Schätzung von ca. 750-800 Mio. t liegt¹¹⁰. Baumaterialien machen also etwa die Hälfte aller Inputströme in die Technosphäre aus.

¹⁰² § 3, Abs. 1 ChemG

¹⁰³ § 3, Abs. 5 ChemG

¹⁰⁴ vgl. Kümmerer/Bunke (1992, Kap. C., S. 4)

¹⁰⁵ Art. 1, Abs. 2 Bauproduktenrichtlinie

¹⁰⁶ kleinste, aus Baustoffen geformte Einheit mit festgelegten Abmessungen

¹⁰⁷ Die Einteilung stammt von Albrecht et al. (1984)

¹⁰⁸ Streng genommen ist Luft kein „Gut“, da hierfür kein Marktpreis vorliegt, sondern eine kostenlose Nutzung ermöglicht wird. Dieses Dilemma der nicht adäquaten Berücksichtigung kostenloser Güter wird nochmals in Kapitel 3 bei der Diskussion von Konzepten zur Stoffstromsteuerung aufgegriffen.

¹⁰⁹ Lampert et al. (1996, S. 138)

¹¹⁰ vgl. ITAS/ifib (1998, S. 88), Bringezu (1996, S. 200), BBR (1998, S. 45)

Von diesen rund 800 Mio. t pro Jahr entfallen fast 95 % auf Produkte der Steine- und Erden-Industrie, die wiederum ihre Produkte in etwa zu gleichen Teilen an den Hoch- und den Tiefbau abgibt. Während Natursteine für den Tiefbau, Kalkstein, Kalkmergel, Naturgips und Bims etwa 300 Mio. t ausmachen, entfallen rund 350 Mio. t auf Sand und Kies, der im wesentlichen als Zuschlagstoff für Beton und zum Einsatz im Wegebau verwendet wird. Etwa 50 Mio. t stellen Tone für die Ziegelindustrie dar. 1990 erreichte die Branche einen Umsatz von etwa 35 Mrd. DM in knapp 3500 Betrieben mit 150000 Beschäftigten¹¹¹. Im Vergleich zu anderen Bereichen liegt die Produktionsleistung in der Steine- und Erden-Industrie mit rund 50-100 DM/t sehr niedrig.

Obwohl für die Zukunft mit einem Rückgang der Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen gerechnet wird, bleibt die jährlich umgesetzte Menge von rund 500 Mio. t im Jahr 2040 immer noch beträchtlich.

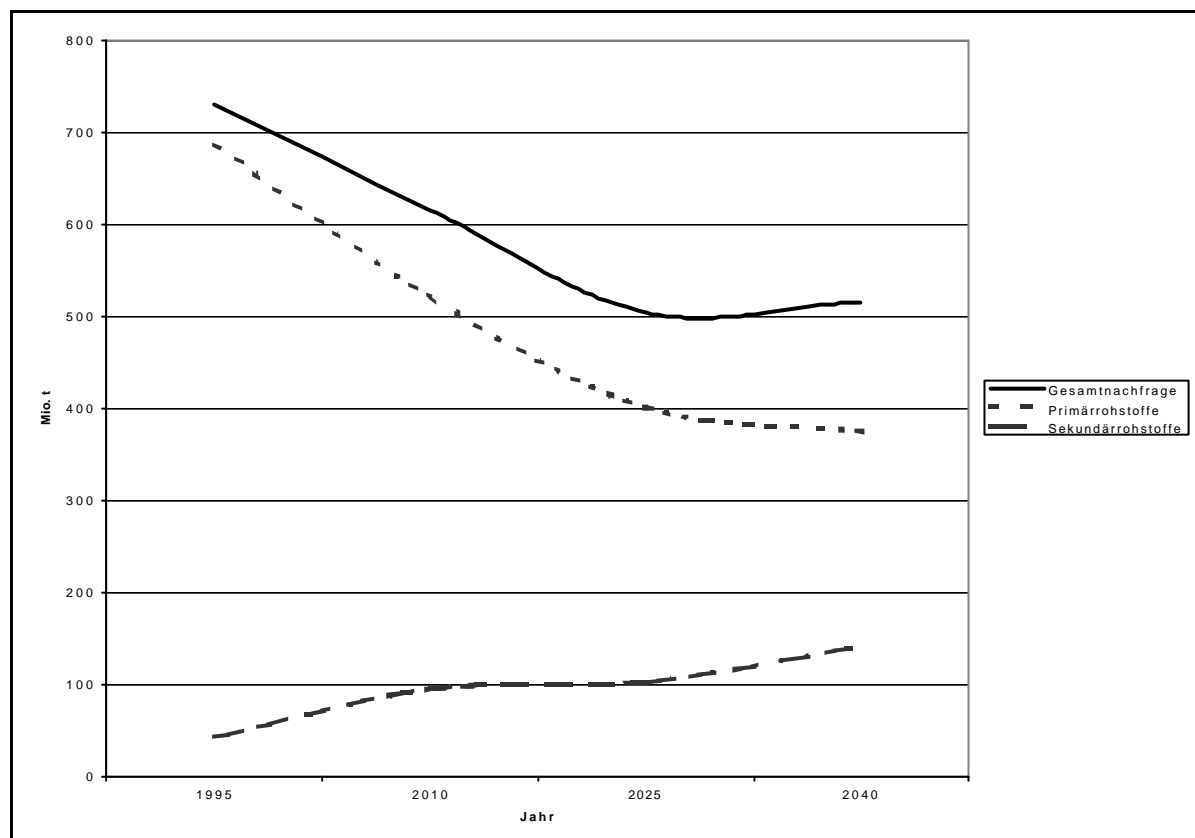


Abbildung 3.1: Prognose der Nachfrage nach mineralischen Baustoffen in Deutschland 1995-2040¹¹²

Es wird in den kommenden Jahrzehnten eine Herausforderung darstellen, die Versorgung mit diesen Baustoffen sicherzustellen und ihren ordnungsgemäßen Verbleib zu steuern.

3.3 Die Bauwirtschaft in der Abfallwirtschaft

Ähnlich wie auf der Versorgungsseite stellt sich das Problem der Mengen auf der Abfallseite dar. Vom gesamten Abfall- und Reststoffaufkommen in Deutschland nehmen die Bauabfälle

¹¹¹ vgl. Hennecke (1993, S. 3)

¹¹² BBR (1998, S. 45)

sowohl gewichtsbezogen als auch mengenbezogen einen bedeutenden Anteil ein. In der Abfallstatistik 1993 werden rund 230 Mio. t an Abfall- und Reststoffmengen genannt, wovon 100 Mio. t auf Bodenaushub, 31 Mio. t auf Bauschutt, 11 Mio. t auf Straßenaufbruch sowie 2 Mio. t auf Baustellenabfälle entfallen. 85 Mio. t werden als Produktionsrückstände sowie Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gelistet. Allein die statistisch erfassten Mengen an Bauschutt betragen jährlich 400 kg / Einwohner!

Die Richtigkeit der Größenordnung insbesondere für Bauschutt ist aus mehreren Gründen fraglich:

- Bauabfälle und Bauschutt werden auch in anderen statistischen Kategorien geführt, etwa Holzabfälle, Glasabfälle, Gipsabfälle, Anstrichmittel, Lacke, Kunststoffabfälle, Eisenschrott etc.
- Die Statistik erfasst nur Betriebe mit mehr als 20 Mitarbeitern. Kleinbetriebe könnten für weitere Abfallmengen von etwa 10-20 % des statistischen Anfalls verantwortlich sein.
- Verbreitet sind noch Unsicherheiten und Schätzungen bei der Bestimmung von Mengen anzutreffen, etwa bei Bauschutt-sortieranlagen und bei Deponien.
- Ein Großteil des Bauabfalls wird nicht als Bauschutt deklariert entsorgt. Hierfür kommen insbesondere die Hausmüllentsorgung, die Wiederverfüllung von Rohstoffabbauflächen, sowie insbesondere die „wilde“ Deponierung in Betracht, wozu auch Brachen gehören. Kohler schätzt, dass die hierdurch anfallende Menge etwa in der Größenordnung der Bauschuttmengen liegt (ca. 30 Mio. t pro Jahr), nach Glenck et al. könnte diese Menge sogar bis zum Vierfachen der derzeit erfassten Menge betragen¹¹³.

Die Entsorgung von Bauschutt stellte bis Mitte der 80er Jahre kein unmittelbares abfallwirtschaftliches Problem dar, da zum einen genügend Deponieraum vorhanden war und zum anderen von der Ungefährlichkeit der abgelagerten Mengen ausgegangen wurde. Mittlerweile geht jedoch der Deponieraum stark zurück, auch ist eine Ablagerung auf Bauschuttdeponien mit geringen Anforderungen nicht mehr möglich. Obgleich Analysen der Zusammensetzung der Bauabfälle immer wieder zeigen, dass eine gezielte Wiederverwertung von mengenbedeutsamen Inhaltsstoffen wie Beton und Ziegel eine deutliche Schonung des Deponieraums ermöglicht, ist der Baubereich immer noch ein entscheidender Abfallproduzent. Es herrscht immer noch ein niedriger Stand der Verwertung, z.B. 18 % bei Bauschutt aus Gebäuden¹¹⁴, der durch die zunehmende Veränderung des Bauschutts durch neue Substanzen mit Gefährdungspotenzial nur mit großen Anstrengungen zu verbessern ist.

Der Stoffumsatz im Baubereich ist weit von einem Fließgleichgewicht entfernt. Der Input übersteigt den Output um den Faktor 5-10, was zum Aufbau eines riesigen Lagers in der Anthroposphäre führt. So wurden in Deutschland 1993 rund 1,9 Mio. m² Wohn- und Nutzfläche in Wohngebäuden abgerissen (18.470 Wohnungen), während 36,1 Mio. m² Wohn- und Nutzfläche in Wohngebäuden erstellt wurden (404.413 Wohnungen). Geht man von einem Bestand von etwa 2,9 Mrd. m² aus (80 Millionen Einwohner, jedem stehen durchschnittlich etwa 36 m² zu), ergibt sich hieraus eine Abgangsrate von lediglich 0,095 % bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 100 Jahren. Mit anderen Worten: ein heutzutage erstelltes Wohngebäude würde bei gleichbleibender Abgangsrate erst in über 1000 Jahren abgerissen

¹¹³ vgl. ITAS/ifib (1998, S. 232), Glenck et al. (1996, S. 130)

¹¹⁴ vgl. Schultmann (1998, S. 1)

werden. Wenn sich die Abgangsrate in Zukunft irgendwann einmal an die durchschnittliche Nutzungsdauer von 100 Jahren anpasst (also auf 1 % steigt), steigen auch die abzureißenden Mengen um den Faktor 10 gegenüber heute¹¹⁵.

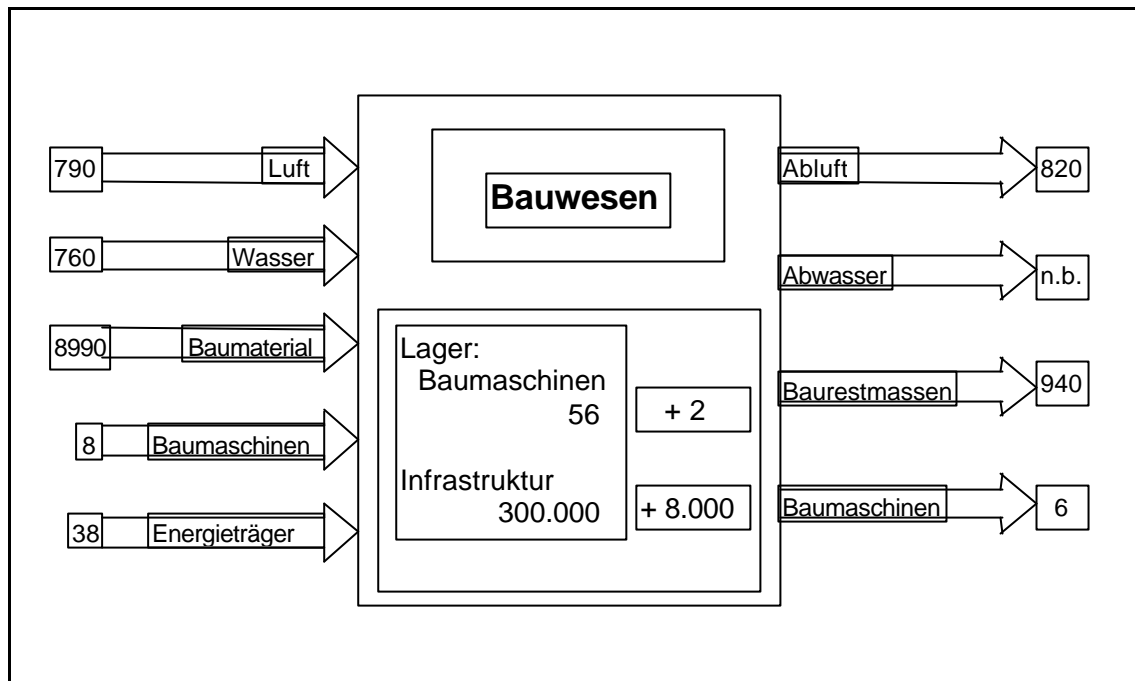


Abbildung 3.2: Güterfluss im Bauwesen Österreichs, Angaben in Kilogramm pro Einwohner und Jahr¹¹⁶

Folge des höheren Inputs gegenüber dem Output ist der Aufbau eines riesigen Lagers, das mit einer unveränderten Dynamik wächst. In einer Untersuchung in Österreich wurde festgestellt, dass das Lager jährlich pro Kopf um 8 t bzw. täglich um 20 kg wächst. Auch für Deutschland dürften ähnliche Werte gelten: Bilitewski beziffert für 1984 die Masse hergestellter Bauprodukte auf 550 Mio. t (abgeleitet aus den Produktionszahlen für Sand und Kies, Naturstein, Kalk, Dolomitstein und Zement), während bauliche Abfälle in Höhe von 126 Mio. t anfielen (Bodenaushub, Bauschutt, Straßenaufbruch). Abzüglich der rezyklierten Masse von 12 Mio. t bleibt eine Deponierung von 114 Mio. t. Verglichen mit der hergestellten Produktmasse von 550 Mio. t bleibt ein Nettozuwachs von 435 Mio. t im Jahr 1984, entsprechend über 7 t pro Einwohner¹¹⁷.

In den kommenden Jahren und Jahrzehnten wird daher die Menge an Abfall aus dem Baubereich stark zunehmen, da die Lebensdauer vieler Baustoffe demnächst abgelaufen sein wird. Weiterhin verstärken Effekte wie der Verschleiß vieler Baustoffe, die insbesondere nach dem Zweiten Weltkrieg verwendet wurden, eine stärkere Orientierung der Gebäudeplanung am Bestand zur Vermeidung einer weiteren Bodenversiegelung (Ersatzbau statt Erweiterungsbau) sowie die Betonung der funktionalen Eigenschaften eines Gebäudes im Sinne seiner Nutzenerfüllung, insbesondere bei Nicht-Wohngebäuden, den zukünftigen Abfall-

¹¹⁵ vgl. Spengler (1994, S. 114). Er errechnet eine Abgangsrate von 0,09% bei der Betrachtung der 1990 rückzubauenden Wohngebäude im Regierungsbezirk Karlsruhe

¹¹⁶ Lahner (1994, S. 9)

¹¹⁷ Bilitewski (1992, S. 486)

strom¹¹⁸. Herkömmliche Verfahren der Trendextrapolation aus der vergangenen Entwicklung der Abfallmengen führen hier zu falschen Ergebnissen, erforderlich ist vielmehr eine differenzierte Betrachtung des Bestands.

Bedingt durch den in den letzten Jahrzehnten zunehmenden Einsatz von Bauchemikalien, Kunststoffen und Metallen im Bauwesen müssen heute auch zunehmend **qualitative** stoffliche Aspekte berücksichtigt werden. Stoffe, die im Bauwesen gespeichert sind und aus diesem in Form von Baurestmassen heraustreten, besitzen ein beträchtliches stoffliches Potenzial, das im Hinblick auf eine umweltgerechte Endlagerung und eine möglichst von unerwünschten Anreicherungen freie Kreislaufführung bewirtschaftet werden muss. Große Mengen an mineralischem Material sind durch einen geringen Anteil an Störstoffen verunreinigt, die die Wiederverwertung des gesamten Materials in Frage stellt. Aufgrund neuer Anforderungen, etwa durch den Parameter Glühverlust in der TA Siedlungsabfall, kommen daher Bauabfälle mit höheren Anteilen nichtmineralischer Substanzen in die Problemlage, einerseits nicht für eine einfache Verwertung geeignet und andererseits auch nicht ohne weiteres deponierbar zu sein.

Brunner¹¹⁹ formuliert zur Beherrschung der Baustoffströme in der Abfallwirtschaft ein Raster für die Ableitung von Maßnahmen zur Umsetzung der vier im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz formulierten Zielsetzungen¹²⁰:

1. **Schutz des Menschen und der Umwelt:** Schädliche, nachteilige oder sonst das allgemeine menschliche Wohlbefinden beeinträchtigende Einwirkungen auf den Menschen sowie auf Tiere, Pflanzen und deren Lebensgrundlagen und deren natürliche Umwelt sollen so gering wie möglich gehalten werden.

Sämtliche Entsorgungssysteme müssen als Ganzes umweltverträglich sein. Aus ihnen entstehen nur drei Klassen von Materialien: wiederverwertbare Güter, endlagerfähige Reststoffe und langfristig umweltverträgliche Emissionen in Wasser, Luft und Boden.

2. **Schonung der Reserven** Rohstoff- und Energiereserven sollen geschont werden.

Dabei gilt, dass Material erst dann als wiederverwertbar im Sinne der Reservenschonung bezeichnet wird, wenn dafür sowohl eine Technik der Aufbereitung als auch ein Markt existieren.

3. **Schonung des Deponieraums:** Der Verbrauch an Deponievolumen soll so gering wie möglich gehalten werden.

Dabei ist Schonung sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht zu verstehen. Unter qualitativer Schonung von Deponieraum wird verstanden, dass umweltgefährdende Stoffe möglichst in konzentrierter Form anfallen sollen (möglichst geringe Dissipation). Durch die ausschließliche Ablagerung chemisch ähnlicher Abfälle soll einerseits ihre zukünftige Nutzung erleichtert werden, und andererseits die gegenseitige Beeinflussung und Mobilisierung unterschiedlicher Stoffe im Deponiekörper ausgeschlossen werden (Endlagerung in Monodeponien).

¹¹⁸ Zu Prognosen über die Entwicklung der Abfallmengen vgl. ITAS/ifib (1998, S. 245 ff.), BBR (1998, S. 40 ff.), Rahlwes (1993, S. 120)

¹¹⁹ vgl. Brunner/Stämpfli (1993, S. 27-48). Ferner Glenck et al. (1997, S. 18)

¹²⁰ Abfallwirtschaftsgesetz Österreich (1990)

4. **Nachsorgefreie Deponien:** Nur solche Stoffe sollen zurückbleiben, deren Ablagerung kein Gefährdungspotenzial für nachfolgende Generationen darstellt.

Dies wird dann erfüllt, wenn ausschließlich endlagerfähige Abfälle abgelagert werden. Der Stoff gibt dann in einer geeigneten Hülle langfristig nur jene Stoffe an die Umweltkompartimente ab, welche diese in ihren chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften nicht beeinträchtigen.

Daraus lassen sich folgende Bedingungen für eine optimierte Abfallwirtschaft von Baureststoffen ableiten:

- Anpassung der Restflüsse aus der Abfallwirtschaft in die Umwelt an die lokalen Gegebenheiten
- Recycling von Baurestmassen mit dem Ziel eines maximierten Wiedereinsatzes
- Minimierung des benötigten Deponievolumens für Baurestmassen durch Aufkonzentration der in den abgelagerten Abfällen enthaltenen Stoffe
- Anlage von Monodeponien für Stoffe zur Erreichung einer minimalen Stoffdissipation in der Umwelt auch unter dem Aspekt der ressourcenschonenden Zwischenlagerung von chemisch ähnlichen Materialien

Die Bewertung der Maßnahmen muss dabei im Hinblick auf sämtliche Zeithorizonte (kurz-, mittel- und langfristig) erfolgen und gerade im Baubereich die Verweilzeiten von Stoffen in der Anthroposphäre sowie die Größe und die Zusammensetzung des bereits vorhanden Stofflagers in der Anthroposphäre mit berücksichtigen.

Ziel	Kriterium	Maßnahmen	Orientierungsmaßstäbe	Stoffflüsse	Verknüpft mit
Menschen- u. Umweltschutz	1.1 Umweltgerechte Entsorgungsmöglichkeit von Bauabfällen	Minimierung der Emissionen bei Behandlung der Abfälle im Vergleich zu anderen Stoffflüssen in die Umwelt	Restflüsse aus der Bauwirtschaft in die Umwelt; Grenzwerte für Luft, Wasser, Boden	Einbettung der Bauwirtschaft in der Region; Vergleich mit geogenen Referenzen	3.1; 4.1; 4.2
	1.2 Verwertbarkeit bestimmter Bestandteile in Bauabfällen	Getrennte Sammlung und umweltgerechte Verwertbarkeit (ökonomisch und ökologisch sinnvolle Maximierung der Rezyklierung)	bautechnische Kriterien für Recyclingmaterial; Restflüsse in die Umwelt aus Produktion und Wiederverwertung; Mengenschwelle TrennVO	Stoffkonzentration in aufbereitetem Material (spez. Anreicherungen), Eluatwerte	1.3; 2.1; 2.3; 3.1
	1.3 relevanter Schadstoffgehalt in Baustoffen und Bauabfällen	Reduzierung der Schadstoffgehalte im Produkt mit Rückwirkung auf Produktdesign; Form, Schädlichkeit und Dissipation der Stoffe	ökotoxikologische Untersuchungen, Eluatkonzentrationen	Stoffflüsse in Baumaterialien (Güterflüsse mal Stoffkonzentrationen)	1.1; 2.1; 4.1
	1.4 Transport von Baumaterialien	Optimale Transportwege; autarke Entsorgungspflicht für jede Region; Gebot zur max. Versorgungsautarkie	Vergleich der Emissionen durch Baumaterialien mit anderen Quellen	Stoffflüsse der Emissionen in die Umwelt	1.1
Schonung von Rohstoff- und Energiereserven	2.1 Potenzial an gewinnbaren Stoffen aus Bauabfällen	ökonomisch u. ökologisch sinnvolle Maximierung der Verwertung; Verlängerung der Bestandsdauer im Puffer	Verbrauch Rohstoffe vs. Anfall Recyclingmaterial; Grenzen der TrennVO	Dispersion der Stoffe (z.B. Al in Fensterrahmen vs. Al im Beton)	
	2.2 Nicht beherrschbare Umweltbelastung und Energieverbrauch bei Primärproduktion von Baustoffen	Stärkere Verwertung (Sekundärrohstoffe), wenn Schadstoffströme verringert und Energie eingespart werden kann	Energieverbrauch und Emissionen bei der Primärproduktion	Energieverbrauch, Stoffflüsse aus der Primärproduktion in die Umwelt	
	2.3 Nutzungsmöglichkeiten der chemisch gebundenen Energie in Bauabfällen	Nutzung der gebundenen Energie, wenn mit hohem Wirkungsgrad möglich und Energiegewinn	Energieeinsparung durch Verbrennung (Holz, Kunststoffe)	Emissionen bei der Verbrennung, Deponierung der Verbrennungsrückstände	

Ziel	Kriterium	Maßnahmen	Orientierungsmaßstäbe	Stoffflüsse	Verknüpft mit
Schonung von Deponievolumen	3.1 Vorhandenes, verfügbares Deponievolumen	Stärkere Verwertung (Sekundärrohstoffe), wenn verfügbares Deponievolumen klein (wenige Jahre)	Deponiekataster	Schätzung des zukünftigen Volumenbedarfs für Deponierung	
	3.2 Ausbau- und Neubaumöglichkeiten für Deponien	Stärkere Verwertung (Sekundärrohstoffe), wenn Ausbau und Neubau schlecht möglich	regionale Gegebenheiten, Raumplanung	zukünftigen Volumenbedarf für Deponierung schätzen	
Nachsorgefreiheit der Entsorgung	4.1 Kurz- und mittelfristige (<= 10 Jahre) Schadstoffemissionen aus Abfällen (gasförmig oder flüssig)	Ähnliche Größenordnung der Schadstoffgehalte der Emissionen und Eluate im Vergleich zu anderen Stoffströmen	Vergleich geogene zu anthropogenen Stoffflüssen und Stofflager	Größenordnungen der Stoffflüsse und Stofflager	
	4.2 Langfristig mögliche Emissionen (> 100 Jahre) in gasförmiger oder flüssiger Form	Gesamtgehalte an Schadstoffen u. Freisetzungsmöglichkeiten gering halten Bindungsformen und Depo-niemilieu beachten	Gesamtgehalte, Reaktionsprodukte, Wasserhaushalt der Deponie	Modellierung der Stoffflüsse aus der Deponie	
	4.3 Generelle Deponierbarkeit von Abfällen	Ablagerungsverbot für flüssige, brennbare, infektiöse, reaktionsfähige oder andere gefährliche Abfälle	Deponieverordnungen	Schätzung der maximalen Restflüsse in der Deponie	

Tabelle 3.3: Aus Zielen der Abfallwirtschaft abgeleitete Kriterien zur Beurteilung von Maßnahmen

3.4 Das Zeitproblem

Neben der Problematik der dominierenden Mengen sind die langen Verweilzeiten charakteristisch für den Baubereich. In keinem anderen Wirtschaftssektor sind die Stoffe so lange im technosphärischen Zwischenlager gebunden wie im Baubereich. Gebäude überdauern selbst ein Menschenleben und werden oft über mehrere Generationen hinweg genutzt.

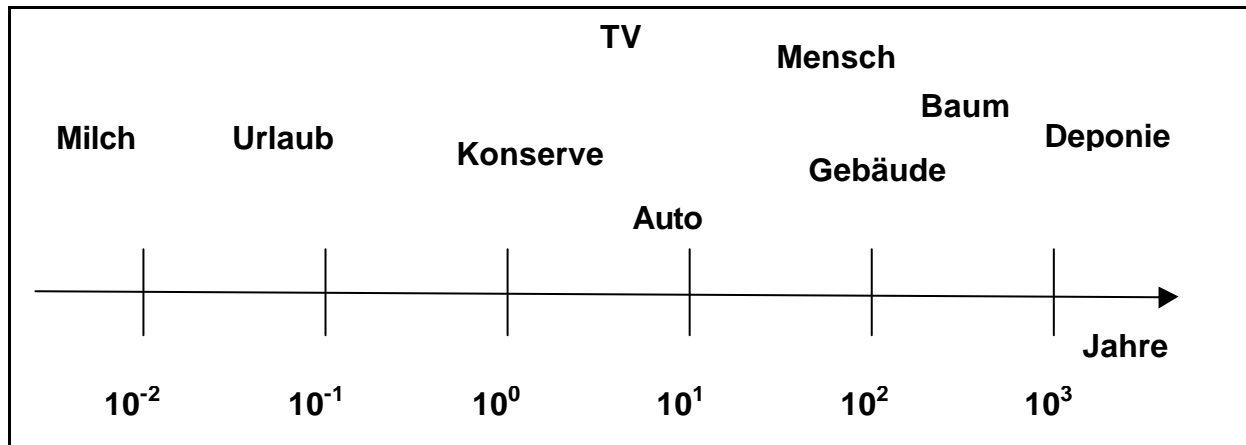


Abbildung 3.3: Typische Lebensdauern von Produkten

Zum einen resultiert hieraus, dass wir heutzutage beim Abfall mit Produkten und Stoffen konfrontiert sind, die zum Teil vor 10, häufig vor 50-100, teilweise jedoch vor 150 Jahren erstellt und in den Baubereich eingebracht wurden. Diese Materialien weisen unterschiedlichste, den jeweiligen technologischen Stand und gesellschaftliche Wertschätzung entsprechende Eigenschaften auf, die jedoch nicht bekannt sind oder nur unter großem Aufwand analysiert werden können. Anders als bei kurzlebigen Konsumgütern bringen die langen Aufenthaltszeiten im Bauwesen eine starke Heterogenität der Stoffe durch den zeitgleichen Anfall von Stoffen aus unterschiedlichen Bauperioden mit sich („Späterkennung“). Gerade am Beispiel des Betons zeigt sich die Unterschiedlichkeit der Rezepturen zur Erfüllung spezifischer Funktionalitäten im jeweiligen Anwendungsumfeld. Es müssen also, angesichts jetzt wirksam werdender Restriktionen wie etwa verschärfte Anforderungen an zu deponierende Baustoffe oder Verknappung des Deponieraums, unmittelbar technisch-ökonomische Lösungen zur Behandlung von Abfällen früherer Generationen entwickelt werden.

Auf der anderen Seite entsteht die Verpflichtung, Bauprodukte, die in den Baubereich eingebracht werden, so zu gestalten, dass die Belastungen für zukünftige Generationen minimiert werden. Es ist eine besondere Schwierigkeit, Maßnahmen hierzu zu ergreifen, da die Wirkungen dieser Maßnahmen häufig erst in Jahrzehnten sichtbar werden, zu einem Zeitpunkt, an dem die technologischen, ökonomischen und sozialen Rahmenbedingungen nicht bekannt sind und sich wesentlich von den heutigen Faktoren unterscheiden.

So wird zum Beispiel durch den Erlass neuer Wärmeschutzverordnungen, die unmittelbare Wirkung zeigen, die Verwendung von Dämmmaterialien wie Isolierschäume, Innenraumauskleidungen, Kunststoff- und Fassadenverkleidungen sowie allgemein der Einsatz spezifischer Bauchemikalien wie Anstrichmittel, Lösemittel und Dichtungsmassen stark zunehmen. Diese mengenmäßig zwar kleinen Anteile tragen aber unkontrolliert Schadstoffe in den Baubereich ein und beeinträchtigen die Umweltverträglichkeit einer großen Menge unbedenklichen Baustoffe in einigen Jahrzehnten erheblich. Es ist auf die Trägheit des Systems Baube-

reich zurück zu führen, dass hierdurch eine Verschiebung der Problemstellung auf zukünftige Generationen eintritt. Allerdings ist das Abfallaufkommen der Zukunft in praktisch keinem Bereich der Technosphäre so gut vorherzusehen wie im Baubereich, da das verwendete Material während seiner Verweilzeit im Zwischenlager sowohl hinsichtlich der Menge als auch hinsichtlich der Zusammensetzung praktisch keinerlei Veränderungen erfährt. Lediglich die genaue zeitliche Verteilung ist mit einer statistischen Unsicherheit aufgrund einer variablen Nutzungsintensität versehen.

3.5 Das Problem der Verantwortlichkeiten

Bauen ist ein komplexer Prozess, an dem eine Vielzahl von Akteuren beteiligt sind¹²¹:

- Bauherren (Privatpersonen, Unternehmen, öffentliche Hand)
- Wirtschaftliche Akteure mit unmittelbarem Einfluss (Rohstoffverarbeiter, Baustoff- und Bauprodukthersteller, Baustofflieferanten, bauausführende Unternehmen (Handwerker), Baustoff-Recycler)
- Wirtschaftliche Akteure mit mittelbarem Einfluss (Baustoffhandel, Banken, Rohstoffförderer, Deponiebetreiber)
- Freie Akteure (Planer, Architekten, Bauingenieure)
- Akteure mit Einfluss auf die Rahmenbedingungen (Verbände, Normungsorganisationen)
- Staatliche Akteure (Genehmigungsbehörden, Bauaufsicht, Bauordnungen, Gesetzgeber)

Neben dieser sehr heterogenen Struktur sind kleine und kleinste Betriebe kennzeichnend, ferner eine häufig anzutreffende geringe Lebensdauer von Unternehmen¹²².

Durch die Vertragsgestaltung und die rechtlichen Rahmenbedingungen ergeben sich etwa für Planer und bauausführende Unternehmen unterschiedliche Verantwortungsbereiche. Generell sind Bauherr und Planer für die Auswahl der dauerhaft ins Bauwerk eingehenden Bauprodukte verantwortlich, während das bauausführende Unternehmen für die Auswahl der nicht dauerhaft verbauten Bauhilfsstoffe zuständig ist.

Es ist auch auf die spezielle Zeitproblematik zurückzuführen, dass im Gegensatz zu anderen Produkten kein Baustoffhersteller oder Inverkehrbringer bereit ist, eine Verantwortung für die Entsorgung der Baustoffe zu übernehmen. Begründet wird dies zum einen damit, dass die Veränderung, die der Baustoff bzw. das Bauprodukt durch ortsbedingte Zusätze erfährt, nicht im Verantwortungsbereich des Baustoffherstellers liegen, ferner damit, dass die Baustoffe aufgrund der langen Verweilzeit im Baubereich Veränderungen unterliegen und zum dritten, dass es wenig sinnvoll sei, angesichts der Unsicherheit in bezug auf zukünftige Rahmenbedingungen im Vorfeld Verantwortung zu übernehmen¹²³. Aus Sicht der Baustoffhersteller ist der Bauherr als Entscheider für die Entsorgung der Baustoffe verantwortlich.

Obwohl die Verantwortung für die ordnungsgemäße Entsorgung von Baustoffen beim Eigentümer des Bauwerks liegt, ist die Regelung wenig motivierend, da zum Zeitpunkt der Entsor-

¹²¹ vgl. hierzu z.B. Grießhammer/Buchert (1996, S. 15 ff.)

¹²² Auch bei großen Baugesellschaften kommt es vergleichsweise häufig zu Konkursen und damit zu einer Wirkungslosigkeit von Ansprüchen.

¹²³ Mündliche Auskunft Dr. Kersten, Bundesverband Gips am 18.12.98. Im Gegensatz hierzu greift etwa bei Kraftfahrzeugen seit kurzem die Produktverantwortung der Hersteller auch für die Entsorgung.

gung i.d.R. der Eigentümer und der frühere Bauherr nicht mehr identisch sind. Es besteht also für den Eigentümer keine Einflussmöglichkeit auf den zu leistenden Entsorgungsaufwand, im Gegenzug besteht für den Bauherrn kein Anreiz, Überlegungen einer aufwandsminimalen Entsorgung in seine Entscheidungen einzubeziehen.

In diesem Zusammenhang werden von Jörisen et al. Maßnahmen wie ein Baustoffpass oder die direkte Kennzeichnung von Baumaterialien diskutiert, damit Angaben über die verwendeten Bauprodukte, ihre stofflichen Zusammensetzung und ggf. der Hersteller während der Lebensdauer eines Bauwerks erhalten bleiben¹²⁴. Somit wären bei der Entsorgung die erforderlichen Hinweise auf die angemessene Behandlung und Verwertung des angefallenen Bauschutts bekannt. Die Problematik liegt in der Langlebigkeit der Produkte, die einen Verlust der Informationen befürchten lässt, ehe der Zeitpunkt der Entsorgung gekommen ist.

Angeregt wird auch die Einführung einer „Schadstoffhypothek“, die im Grundbuch einzutragen wäre, damit von Eigentümer zu Eigentümer weitergegeben würde und schließlich zur Deckung der Entsorgungskosten verwendet werden könnte. Dadurch würde schon für den Bauherrn ein Anreiz für die Verwendung schadstoffarmer und wiederverwertbarer Baustoffe geschaffen. Die Schwierigkeit dieses Vorschlags liegt in der Umsetzung der Schadstofffracht in eine bestimmte Geldsumme im Hinblick auf eine zukünftig unbekannte Höhe der Entsorgungskosten, so dass letztendlich nur eine pauschale Bewertung von Baustoffen möglich wäre¹²⁵.

Angesichts der geschilderten Schwierigkeiten bleibt als einziger Ausweg eine kooperative Lösung, in der alle Beteiligten ihre bereits heute bestehende Verantwortung für die Abfallströme zukünftiger Generationen realisieren und dementsprechend agieren. Eine derartige kooperative Lösung wird jedoch erst langfristig umzusetzen sein, da sie nicht in allen Fällen mit einem kurzfristigen, rational-ökonomischen Verhalten koinzidiert.

3.6 Rechtliche Grundlagen

Rechtliche Regelungen zur Vermeidung von Umweltbelastungen insbesondere durch Baustoffe, aber auch durch Bauprozesse, lassen sich sowohl im Umweltrecht als auch im Baurecht finden, wobei seit Beginn der 90er eine kontinuierliche Zunahme der Vorschriften zu verzeichnen ist. Während das Umweltrecht allgemeine, nicht bauspezifische Anforderungen zum Schutz von Umweltmedien formuliert und damit indirekt den Vorgang der Herstellung, Inverkehrbringung, Verwendung und Entsorgung von Baustoffen tangiert, regelt das Baurecht die Zulassung von Baustoffen, insbesondere im Hinblick auf deren Eignung zur Erfüllung spezifischer Funktionalitäten wie etwa Stabilität, Festigkeit und Feuerschutzeigenschaften¹²⁶.

Umweltrecht

Gefahrstoffrecht
Wasserrecht
Immissionsschutzrecht
Abfallrecht
Bodenschutz / Altlasten

Baurecht

EG-Bauproduktenrichtlinie
Bauproduktengesetz
Musterbauordnung

¹²⁴ vgl. Jörisen et al. (1993, S. 120)

¹²⁵ vgl. Klöpfer/Delbrück (1993, S. 79)

¹²⁶ Jörisen et al. (1993, S. 76 ff.)

Angesichts der mengen-, zeit- und verantwortungsspezifischen Besonderheiten des Baubereichs kommt den rechtlichen Rahmenbedingungen der Bauabfallbehandlung ein besonderer Stellenwert zu. Der Umgang mit Bauabfällen ist dabei in einer Reihe von bundes- und landesrechtlichen Vorschriften geregelt.

An der Spitze dieser gesetzlichen Regelungen steht das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), das am 07.10.1996 in Kraft trat und das bis dahin gültige Abfallgesetz aus dem Jahr 1986 ablöste. Erstmals ist in diesem Gesetz explizit das Ziel einer rückstandsarmen Kreislaufwirtschaft und damit des Recyclings als Element geschlossener Stoffkreisläufe mit aufgenommen worden. Zentral ist ein neuer, vorsorgeorientierter Abfallbegriff, der unter Abfällen alle Produkte und Reststoffe versteht, die weder zielgerichtet produziert noch zweckentsprechend eingesetzt werden und deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss¹²⁷. Damit sind auch Stoffe wie etwa Gips aus Rauchgasentschwefungsanlagen erfasst, die früher als Wirtschaftsgüter frei handelbar waren und nicht dem Abfallrecht unterlagen.

Der Gesetzgeber unterstellt in § 3 Abs. 3 KrW-/AbfG einen Entledigungswillen bei allen beweglichen Sachen,

1. die bei der Energieumwandlung, Herstellung, Behandlung oder Nutzung von Stoffen oder Erzeugnissen oder bei Dienstleistungen anfallen, ohne dass der Zweck der jeweiligen Handlung hierauf gerichtet ist, oder
2. deren ursprüngliche Zweckbestimmung entfällt oder aufgegeben wird, ohne dass ein neuer Verwendungszweck unmittelbar an deren Stelle tritt.

Für REA-Gips folgt hieraus, dass der Tatbestand der Abfalleigenschaft erfüllt ist, da er im Rahmen der Energieumwandlung anfällt, ohne dass die Energieumwandlung als solche auf die Herstellung von REA-Gips gerichtet ist.

Entscheidend für die Einstufung als Abfall ist ferner die Produktions- oder Verwendungabsicht des Erzeugers und nicht der tatsächlich vorhandene Entledigungswille des Besitzers. Als Abfallerzeuger gilt jede Person, durch deren Tätigkeit Abfälle angefallen sind oder die Abfälle vorbehandelt, mischt oder behandelt. Dies hat nach Ansicht von Schultmann für den Baubereich eine weitreichende Konsequenz: da es auf die unmittelbare Sachherrschaft zum Zeitpunkt des Abfallanfalls ankommt, ist als Abfallerzeuger immer der Bau- bzw. Abbruchunternehmer, aber nicht der Bauherr anzusehen¹²⁸. Hingegen kommt Klett zu dem Schluss, dass für die bei Bauarbeiten auf dem Grundstück eines Bauherrn anfallenden Abfälle nur der Bauherr als Abfallbesitzer und Abfallerzeuger verantwortlich gemacht werden könne, zumindest solange im zugrunde liegenden Werkvertrag der Bauunternehmer nicht auch mit der Entsorgung beauftragt wird¹²⁹.

Das Gesetz sieht nach §4 Abs. 1 KrW-/AbfG zunächst die Vermeidung von Abfällen durch Verminderung ihrer Mengen und Schädlichkeit vor. Nicht vermeidbarer Abfall wird im folgenden ausdifferenziert und aufgegliedert in

- Abfälle zur Verwertung

¹²⁷ KrW-/AbfG, §3, Abs. 1 Satz 1

¹²⁸ Schultmann (1998, S. 14). Freise schließt sich dem an: „Damit dürfte die Möglichkeit gegeben sein, im Rahmen von Bauarbeiten jeder Art das ausführende Unternehmen als Erzeuger und/oder Besitzer einzustufen“ (Freise 1996, S. 96). Für ihn gilt als Minimalprinzip, dass das Bauunternehmen zumindest nicht auch neben dem Bauherrn die Erzeugereigenschaft besitzt.

¹²⁹ vgl. Klett/Enders (1996)

- Abfälle zur Beseitigung

Die Pflicht zu einer ordnungsgemäßen und schadlosen stofflichen oder thermischen Verwertung ohne Schadstoffanreicherung (§5, Abs. 2 KrW-/AbfG) ist einzuhalten, sofern dies technisch und wirtschaftlich möglich ist und die Beseitigung nicht die umweltverträglichere Lösung darstellt (§5, Abs. 5 KrW-/AbfG). Als stoffliche Verwertung wird nach §4 Abs. 3 KrW-/AbfG die Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen oder die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Abfälle angesehen, wenn der Hauptzweck der Maßnahme auf der Nutzung des Abfalls und nicht in der Beseitigung des Schadstoffpotenzials liegt. Dazu sind Abfälle ggf. getrennt zu halten und zu behandeln (§5 Abs. 2 KrW-/AbfG). Der Gesetzgeber kann Anforderungen an die Getrennthaltung, Beförderung und Lagerung von Abfällen festlegen (§7 Abs. 1 KrW-/AbfG). Freise erwartet, dass mittelfristig mit einer Verordnung zur Getrennthaltung von Bauabfällen zu rechnen sein dürfte¹³⁰.

Die thermische Verwertung beinhaltet nach §4, Abs.4 KrW-/AbfG den Einsatz von Abfällen als Ersatzbrennstoff, wobei es wesentlich darauf ankommt, dass der einzelne Abfall ohne Vermischung mit anderen Stoffen verbrannt wurde, damit verhindert wird, dass durch Zugabe von heizwertreichem Material lediglich eine thermische Beseitigung des Abfalls erfolgt. Die Abfallbeseitigung umfasst nach §10, Abs. 2 KrW-/AbfG das Bereitstellen, Überlassen, Einsammeln, die Beförderung, Lagerung und Ablagerung von Abfällen zur Beseitigung.

Das Gesetz unterscheidet ferner nach überwachungsbedürftigen, nicht überwachungsbedürftigen und besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. Im Rahmen des untergesetzlichen Regelwerks zum KrW-/AbfG wurden in der „Bestimmungsverordnung besonders überwachungsbedürftiger Abfälle“ (BestbÜAbfV) die Vorgaben der EU über 237 Abfallarten in nationales Recht umgesetzt und gleichzeitig eigene Materialien hinzugefügt. Aus dem Baubereich werden folgende Materialien aufgeführt:

170199 D1	Beton, Ziegel, Fliesen, Keramik und Baustoffe auf Gipsbasis oder Asbestbasis mit schädlichen Verunreinigungen
170299 D1	Holz, Glas und Kunststoff mit schädlichen Verunreinigungen
170599 D1	Bodenaushub, Baggergut sowie Abfälle aus Bodenbehandlungsanlagen mit schädlichen Verunreinigungen
170601	Isoliermaterial, das freies Asbest enthält
170699 D1	anderes Isoliermaterial mit schädlichen Verunreinigungen

Alle nicht aufgeführten Materialien zur Beseitigung stellen überwachungsbedürftige Abfälle dar. In der „Verordnung zur Bestimmung von überwachungsbedürftigen Abfällen zur Verwertung“ (BestÜVAbfV) ist festgelegt, dass Bauabfälle zur Verwertung als überwachungsbedürftige Abfälle einzustufen sind und nicht etwa als nicht überwachungsbedürftige Abfälle. Hierzu gehören folgende Materialien:

170101	Beton
170102	Ziegel
170103	Fliesen und Keramik
170104	Baustoffe auf Gipsbasis
170301	Asphalt, teerhaltig
170303	Teer und teerhaltige Produkte

¹³⁰ Freise (1996, S.99)

170502	Hafenaushub
170701	gemischte Bau- und Abbruchabfälle ¹³¹

Weitere, für den Baubereich relevante Verordnungen des untergesetzlichen Regelwerks betreffen die Verordnung über Verwertungs- und Beseitigungsnachweise, die Verordnung zur Transportgenehmigung, die Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe sowie die Verordnung über Abfallwirtschaftskonzepte und Abfallbilanzen¹³².

Neben dem KrW-/AbfG und dem zugehörigen untergesetzlichen Regelwerk bestehen eine Reihe von Verwaltungsvorschriften in Form von Richtlinien, Technischen Anleitungen und Technischen Regeln. Sie haben keinen zwingenden Charakter im Sinne rechtskräftiger Bestimmungen, sondern dienen den Vollzugsbehörden als Prüfungs- und Entscheidungsgrundlage. Insbesondere hat die Festsetzung von Grenzwerten, etwa das Elutionspotenzial von Schadstoffen in Bauabfällen bei der Deponierung, erheblichen Einfluss auf die daraus resultierenden Entsorgungskosten.

Für den Baubereich maßgeblich ist die TA Siedlungsabfall, die festlegt, dass nur noch „reaktionsträge“ Stoffe abgelagert werden dürfen, damit eine nachsorgefreie Ablagerung gewährleistet ist. Ab dem 01.06.2005 (für Bauschutt bereits ab 01.06.2001) sind die Stoffe einer entsprechenden Vorbehandlung zu unterziehen, sofern sie nicht verwertet werden können. Kern der TA Siedlungsabfall ist die Festlegung von Grenzwerten für Schad- und Gefahrstoffe und die daraus folgende Kategorisierung der Deponien hinsichtlich Festigkeit, organischem Anteil sowie Eluatwerte.

Die Kategorie Bauabfälle wird in der TA Siedlungsabfall als einzig geltende Vorschrift in die Begriffe Bauschutt (mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, auch mit geringfügigen Fremdan teilen), Baustellenabfälle (nichtmineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, auch mit geringfügigen Fremddanteilen), Bodenaushub und Straßenaufbruch gegliedert¹³³. Es gelten eine Reihe von Grenzwerten für die Auslaugung aus dem Deponiekörper sowie ein Grenzwert für den maximalen organischen Anteil entsprechend einem Glühverlust von 3 % bzw. 5 % (Deponieklasse I bzw. II)¹³⁴.

Für die Beurteilung der schadlosen Verwertbarkeit von Abfällen nach Maßgabe des KrW-/AbfG, die aufgrund der starken wasserwirtschaftlichen Relevanz in den Hoheitsbereich der Länder fällt, sind in den Technischen Regeln der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) bundeseinheitliche Anforderungen an die stoffliche Verwertung mineralischer Abfälle unter besonderer Berücksichtigung des Grundwasserschutzes aufgestellt. Diese legen konkrete Verwertungsanforderungen in Abhängigkeit von Nutzung und Standortverhältnissen für die Wiederverwendung und Verwertung von mineralischen Abfällen bei Baumaßnahmen fest, wobei eine Aufteilung in Einbau in insgesamt 6 Einbauklassen vorgenommen wird. Ein uneingeschränkter Einbau (Zuordnungswert Z0) ist zulässig, wenn Recyclingbaustoffe mit den in regional vorkommenden natürlichen Böden vergleichbare Schadstoffgehalte aufweisen. Werden die Zuordnungswerte Z1 nicht überschritten, so ist unter Berücksichtigung bestimmter Nutzungseinschränkungen ein eingeschränkter, offener Einbau erlaubt. Bei Überschrei-

¹³¹ Die Nummerierung entstammt dem Europäischen Abfallkatalog, der den bisherigen LAGA-Abfallartenkatalog ablöst.

¹³² Eine kurze Diskussion dieser Verordnungen findet sich bei Schultmann (1998, S. 18 f.) Die Pflicht zur Erstellung von Abfallwirtschaftskonzepten und Abfallbilanzen dürfte im Baubereich nur für die baustoffherstellende Industrie zutreffen. Zur Vorgehensweise bei der Erstellung von Abfallwirtschaftskonzepten und Abfallbilanzen vgl. Stoltenberg (1995).

¹³³ Unter „geringfügig“ wird ein maximaler Anteil von 5 Vol-% verstanden

¹³⁴ Eine Übersicht der Grenzwerte nach LAGA und TaSi sowie ein Vergleich zu den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung findet sich in Anhang 1.

tung gilt die Zuordnungsklasse Z2, welche die Obergrenze für den eingeschränkten Einbau von Recyclingbaustoffen mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen darstellen, durch die der Transport von Inhaltsstoffen in den Untergrund und das Grundwasser verhindert werden soll. Werden diese Zuordnungswerte überschritten, gelten die Zuordnungskriterien für die Deponierung nach der TA Siedlungsabfall.

Die Einhaltung der von der LAGA geforderten Zuordnungswerte für einen hochwertigen Einbau bereitet noch erhebliche Probleme. Die Ergebnisse von Fremdüberwachungen bei Bauschutttaufbereitungsanlagen zeigen, dass der Zuordnungswert Z0 bislang noch überhaupt nicht erreicht wird. Rund zwei Drittel der Sekundärbaustoffe fallen unter die Zuordnungswerte Z1, etwa 20 % müssen deponiert werden. Hauptursachen für die Überschreitung sind die Konzentration von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sowie die Grenzwerte für Sulfat. So finden sich beispielsweise in Mineralwassern Sulfatgehalte von 1200-1500 mg/l, was einer maximalen Sättigung des Wassers mit Sulfat entspricht. Auch ist das Grundwasser in Regionen mit natürlichen Gipslagerstätten mit ähnlichen Sulfatgehalten belastet¹³⁵. Hingegen fordern die Technischen Regeln LAGA ab einem Gehalt von 600 mg/l an Sulfat im Eluat bereits die Deponierung des gesamten Bauschutts, der Zuordnungswert Z0 wird erst unterhalb eines Gehalts von Sulfat im Eluat von 50 mg/l erreicht. Von Seiten der Gipsindustrie wird der LAGA-Grenzwert heftig bestritten, da trotz des hohen geogen bedingten Gehalts bislang keine humantoxischen Auswirkungen von Calciumsulfat auch bei andauernder Aufnahme höherer Konzentrationen gefunden wurden¹³⁶.

Zur Errichtung von Anlagen sind darüber hinaus Rechtsvorschriften der Umweltverträglichkeitsprüfung, des Raumordnungsrechts, des Baurechts sowie des Naturschutzrechts zu beachten. Für Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung sind zusätzlich die Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe (17. BImSchV) samt der Verwaltungsvorschrift TA Luft wirksam¹³⁷.

Über die Verordnungen, Gesetze und Technischen Regelwerke hinaus hat die Bundesregierung bereits im Jahr 1992 Zielfestlegungen für die Verwertungsquoten von Baureststoffen festgelegt, die für das Jahr 1995 eine Verwertung von 60 % des anfallenden Bauschutts, 40 % der Baustellenabfälle sowie 90 % des Straßenaufbruchs vorsah¹³⁸. Zur Unterstützung der Zielerreichung wurde festgeschrieben, dass die öffentlichen Bauträger seit dem 01.06.1991 bei der Ausschreibung und Vergabe von Bauprojekten, insbesondere des Wege- und Straßenbaus, Recyclingbaustoffe unter Beachtung der Umweltverträglichkeit berücksichtigen müssen. In der Fortschreibung der Zielfestlegung bis zum Jahr 2005 hat die Bundesregierung im wesentlichen qualitative Ziele und Maßnahmen formuliert, etwa die Anwendung einer besseren Rückbauplanung zur getrennten Erfassung verwertbarer Bestandteile¹³⁹.

Die Bauwirtschaft ihrerseits hat die in §52 KrW-/AbfG vorgesehene Möglichkeit zur Bildung von Entsorgungsgemeinschaften genutzt und den Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB) gegründet, einen Zusammenschluss von Verbänden und Organisationen der planenden sowie der baustoffproduzierenden Wirtschaft, der bau- und rückbauausführenden Wirtschaft sowie der Recycling- und Entsorgungswirtschaft. Ziel des KWTB ist die Förderung der Umsetzung

¹³⁵ vgl. Holzhey (1997)

¹³⁶ Mündliche Aussage von Dr. Kersten, Bundesverband Gips am 04.11.98

¹³⁷ vgl. Winterfeld (1998, S. 9 ff.)

¹³⁸ Zielfestlegungen der Bundesregierung zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Bauabfällen (1992). Im Jahr 1993 wurden erst 18 % des anfallenden Bauschutts wiederverwertet, gesicherte Daten für die Folgejahre liegen nicht vor.

¹³⁹ Zielfestlegungen der Bundesregierung zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Bauabfällen (1996).

der Kreislaufwirtschaft und die Hilfestellung beim umweltverträglichen Umgang mit Baurestmassen durch Güte- und Überwachungsgemeinschaften. Parallel zur Zielfestlegung der Bundesregierung hat der KWTB 1996 eine freiwillige Selbstverpflichtungserklärung „zur Reduzierung der Ablagerung von verwertbaren Bauabfällen bezogen auf das Bauvolumen gegenüber dem Stand von 1995 bis zum Jahr 2005 auf die Hälfte“¹⁴⁰.

Eine derartige Selbstverpflichtungserklärung ist im Grundsatz zu begrüßen, da sie die Absicht und den Willen der Akteure dokumentiert, an der Zielerreichung mitarbeiten zu wollen. Auch ist der Ansatz einer 50%-igen Reduktion der Ablagerung sinnvoll. Bezogen auf den Inhalt der Erklärung bleiben jedoch einige Fragestellungen, zum einen ist das zukünftige Bauvolumen als solches nicht durch den Aufbau von zusätzlichen Recyclingkapazitäten zu beeinflussen, und zum anderen ändert sich im Laufe von 10 Jahren durch technologische, ökonomische und ästhetische Aspekte der Kreis der verwertbaren Bauabfälle.

3.7 Zusammenfassung

Die vorangegangenen Erläuterungen haben gezeigt, dass der Baubereich sich in wesentlichen Zügen von anderen volkswirtschaftlichen Sektoren unterscheidet und daher eine spezielle Untersuchung rechtfertigt. Insbesondere ist deutlich geworden, dass der Baubereich sowohl im Verhältnis zur restlichen Abfallwirtschaft sowohl qualitativ als auch quantitativ eine überragende Stellung innehat. Ferner zeigt sich, dass es zunehmend wichtiger wird, die gegenwärtig noch bestehende Lücke zwischen Versorgung und Entsorgung mit Baumaterialien zu schließen. Die auf die Behandlung und Beseitigung von Bauabfällen zielende Ausrichtung muss daher abgelöst werden durch die Etablierung einer bauspezifischen Reduktionswirtschaft, die in der Lage ist, nach ökonomischen Kriterien eine Allokation von Gütern und Stoffen in den Baurestmassen vorzunehmen. Der Aufbau dieser Reduktionswirtschaft muss durch ordnungsrechtliche und informatorische Maßnahmen unterstützt werden.

Ferner zeigt sich, dass die Komplexität im Baubereich angesichts der unsicheren Datenlage nur sinnvoll abgebildet werden kann, wenn einzelne Güter oder Stoffe gezielt betrachtet werden. Zur Beschreibung der Dispersion von Stoffen im Baurestmassenstrom, die unverzichtbare Planungsvoraussetzung für den Aufbau der Reduktionswirtschaft darstellt, ist es erforderlich, diejenigen Güter sowie deren Verwendung und Aufkommen zu betrachten, in denen ein Stoff enthalten ist. Somit kann die spezifische Dispersion und die Verfügbarkeit eines Stoffes im Hinblick auf die Kreislaufführung dargestellt werden.

¹⁴⁰ KWTB: Verpflichtungserklärung (1996. Vgl. auch Hummel (1997, S. IX-5). Die Bundesregierung unterstützt dieses quantitative Ziel.

4. MODELL EINER QUALITATIV-QUANTITATIVEN BESCHREIBUNG VON STOFFSTRÖMEN UND STOFFLAGERN

Das nachfolgende Modell soll es ermöglichen, die gegenwärtige Zusammensetzung des Stofflagers eines Stoffes im Baubereich sowohl quantitativ als auch qualitativ zu bestimmen, um damit die Eignung der Güter für die Einbettung in ein Stoffstrommanagement zu bestimmen und eine Planungsgrundlage für die Etablierung der Reduktionswirtschaft im Bauwesen zu schaffen. Ausgehend von dieser zweidimensionalen Bestimmung entlang einer qualitativen Einteilung (Dispersionsgrad) und einer quantitativen Skalierung der Mengen des gegenwärtigen Lagers wird das Modell anschließend durch die Einbeziehung von Produktlebensdauern um eine dynamische Komponente erweitert. Hierdurch wird das Modell zu einem Prognosemodell: ausgehend von der Bestimmung der Mengen und des Dispersionsgrads des heutigen Lagers werden zukünftige Zuflüsse und Abflüsse ins Lager geschätzt und damit eine Prognose für die weitere Entwicklung der Lagermenge, der Lagerzusammensetzung und der Lagerbewegungen angestellt.

Eine Prognose ist eine Aussage über die wahrscheinlichste zukünftige Entwicklung, die auf der Basis der realen Gegebenheiten (empirische Beobachtungen) sowie eines theoretischen Rahmens mit Hilfe von Prämissen erstellt wird. Aufgabe des theoretischen Rahmens der Prognose ist es, diejenigen Faktoren zu identifizieren, die die weitere Entwicklung beeinflussen und diese auf wenige, maßgebliche Parameter zu reduzieren. Dabei nimmt die Zahl der Parameter ab, je weitreichender und aggregierter die Prognose ist, um eine Wirkung klarer ableiten zu können. Die Ableitung der Definition der Parameter und ihrer prognostizierten Stärke erfolgt häufig aufgrund der beobachteten Gegebenheiten. So besitzt nach Wild jede Prognose ihren Ursprung in der Vergangenheit oder zumindest in der Gegenwart, da Ansätze ihrer Wirkung und damit deren Richtung bereits ansatzweise erkennbar sind¹⁴¹. Die Stärke der Wirkung wird aufgrund des theoretischen Rahmens formuliert, wobei häufig eine Gleichmäßigkeit der Entwicklung und insbesondere eine implizite Konstanz von Rahmenparametern unterstellt wird.

Auf Basis des dualen Fundierungsrahmens für Prognosen, nämlich reale Beobachtungen und theoretischer Rahmen, existieren einige unterschiedliche Vorhersagemodelle aus verschiedenen Fachdisziplinen. Einige der gängigsten Formen sind¹⁴²:

- Trendextrapolation: Unter der Annahme, dass die in der Vergangenheit wirkenden Einflussfaktoren auf eine Entwicklung auch in Zukunft weiter Gültigkeit haben, werden Trends und Verläufe der Vergangenheit für die Zukunft in gleicher Weise fortgeschrieben.
- Modellrechnungen: Bei diesen Verfahren werden Modelle formuliert, die das existierende System samt ihrer bereits erkannten und für die Prognose als relevant erachteten Einflussfaktoren abbilden sollen. Dabei werden die Wirkung und die Stärke der Einflussfaktoren für die Zukunft geschätzt, um daraus Aussagen für die Entwicklung des Gesamtsystems treffen zu können.
- Derivative Verfahren: Sie lehnen ihre Prognose an bereits bestehende übergeordnete oder verwandte Prognosen an. Wenn der Nachweis gelingt, dass die Entwicklung des

¹⁴¹ vgl. Wild (1969)

¹⁴² vgl. Müller (1976)

übergeordneten Systems mit der des betrachteten Systems identisch sind, ist die Prognoseerstellung relativ einfach.

- Qualitativ-heuristische Methoden: Sie beruhen auf qualitativen Einschätzungen von Experten und Betroffenen.

Die zu treffende Prognose für die zukünftige Entwicklung des Gipslagers basiert auf einer Modellrechnung zur Beschreibung der bisherigen Situation. Als relevant im Sinne der Prognoseerstellung werden dabei die folgenden drei Parameter erachtet, deren Erarbeitung Gegenstand des Kapitels 4 ist:

- Die qualitative Zusammensetzung des Materials in bezug auf die Eignung zur Kreislaufführung in einem Stoffstrommanagement. Hierzu werden bestehende Ansätze einer quantitativen Erfassung der stofflichen Durchmischung diskutiert und ein Beschreibungsraster für die Dispersion des Stoffes Gips entworfen, das im Hinblick auf die Kreislaufführung Einflussfaktoren aus unterschiedlichen Blickwinkeln in einer gemeinsamen Bewertung zusammenfasst und Materialien somit einen Dispersionsgrad zuweist (Kapitel 4.1).
- Die Verweilzeit der Materialien im Stofflager. In Abhängigkeit der Produkte und ihrer Verwendungsgebiete wird eine probabilistische Lebensdauer definiert, die sich angesichts fehlender empirischer Erkenntnisse an Erkenntnissen der Zuverlässigkeitsforschung orientiert. Als Methode der Beschreibung wird die Kohortenanalyse herangezogen (Kapitel 4.2).
- Die absolute Menge der im Stofflager befindlichen Materialien sowie der augenblicklichen Stoffströme ins Lager und aus dem Lager, die aufgrund der schwierigen Bestimmbarkeit über Statistiken gesondert untersucht werden müssen. Das Modell lehnt sich hierbei im Sinne eines derivativen Ansatzes an Modelle zur Typologisierung des Gebäudebestands und Gebäudeabgangs an (Kapitel 4.3).

4.1 Die Dispersion des Materials

Wer einen Stoffstrom steuern möchte, muss neben den Mengen, die von diesem Stoff zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort auftreten, Aussagen darüber treffen, in welcher Form der Stoff vorliegt, wie er mit anderen Stoffen verbunden ist und wie gut er verfügbar gemacht werden kann. In der Chemie wird das Vorliegen von Stoffen¹⁴³ im Verhältnis zu anderen Stoffen in die Ausprägungen Gemische und Reinsubstanzen eingeteilt. Dabei bezeichnet ein Gemisch „Aggregate aus zwei oder mehr chemisch verschiedenen Substanzen, bei deren Bildung keine chemischen Reaktionen auftreten“¹⁴⁴, eine Substanz kennzeichnet homogene Stoffe einheitlicher Zusammensetzungen mit unveränderlichen Stoffeigenschaften, die sowohl als unvermischte Materie als auch als definiertes Gemisch von Stoffen in Form von Verbindungen vorliegen kann¹⁴⁵.

¹⁴³ Kennzeichnend für Stoffe sind „gleichbleibende charakteristische Eigenschaften unabhängig von der äußeren Form“ (Neumüller, 1987, S. 3997)

¹⁴⁴ Neumüller (1987, S. 1430)

¹⁴⁵ Neumüller (1987, S. 4032)

Stoffe			
Heterogene Gemische	Homogene Stoffe		
	Homogene Gemische	Reinsubstanzen	
		Verbindungen	Elemente

Tabelle 4.1: Einteilung der Stoffe¹⁴⁶

Da Stoffgemische wie etwa die Zusammensetzung der Luft, aber auch die Zusammensetzung von 999er Gold mit einem Fremdstoffanteil von höchstens 0,1 % in der Realität der Regelfall sind, liegt es nahe, nur diejenigen Stoffgemische näher zu betrachten, die das Ergebnis anthropogener Mischungsprozesse sind bzw. die umgekehrt als Ergebnis anthropogener Trennprozesse wieder in Substanzen zerlegt werden können. Formal betrachtet sind diese Substanzen zwar ihrerseits häufig wieder Stoffgemische, entscheidend für die Betrachtungsweise ist jedoch das zu Grunde liegende Interesse der Trennung. Dabei kann die Trennung durch physikalische Methoden erfolgen, man unterscheidet hierbei mechanische Verfahren (z.B. Brechen, Windsichten), kalorische Verfahren (z.B. Destillieren, Verdampfen) und elektrotechnische Verfahren (z.B. Magnetabscheidung, Mikrowellentechnik)¹⁴⁷.

Die Dispersion eines Stoffes soll so beschrieben werden, dass hierdurch Art und Umfang der Vermischung mit anderen Stoffen charakterisiert werden, um darauf aufbauend den Aufwand zur Erfüllung des Misch- oder Trenninteresses abschätzen zu können. Dabei hängt die Bestimmung der Dispersion wesentlich von zwei Faktoren ab:

- Ausmaß der Durchmischung, ausgedrückt als naturwissenschaftlich nachvollziehbares Nebeneinander verschiedener Stoffe in einem Untersuchungsraum. Dabei kommen als Messgrößen sowohl das Verhältnis der Massenanteile der Stoffe in einem Stoffgemisch, bezogen auf einen definierten Raum, als auch die Verteilung dieser Massenanteile in diesem definierten Raum in Frage.
- Zugrunde liegendes, subjektiv motiviertes Misch- oder Trenninteresse, das die Aggregationsebene bestimmt, auf der die Bestimmung der Dispersion in einem Stoffgemisch erfolgt. Hierzu in enger Verbindung steht der Aufwand, der zur Durchführung von Mischung oder Trennung erforderlich ist. Zum einen kann ein exogen vorgegebenes Interesse den Aufwand bestimmen (z.B. Erreichung eines bestimmten Grenzwerts der Konzentration), zum anderen kann der erforderliche Aufwand das Interesse bestimmen (bis zu einer Konzentration x ist die Trennung rentabel).

Im folgenden werden zunächst mit dem Konzept der statistischen Thermodynamik und dem Durchmischungsgrad nach Behrens zwei quantitative Ansätze zur Beschreibung des Ausmaßes an stofflicher Durchmischung vorgestellt, die die bestehenden Mengenverhältnisse sowie Ansätze zu ihrer Veränderung beschreiben. Es zeigt sich jedoch, dass eine quantitative Abbildung eines ganzen Stoffstroms aufgrund der hohen Komplexität in der Realität praktisch nicht leistbar ist und auch im Hinblick auf die Aufgabenstellung, nämlich die Gestaltung des Stoffstroms im Sinne der Grundsätze der Nachhaltigen Entwicklung, keine genügenden

¹⁴⁶ Mortimer (1987, S. 4)¹⁴⁷ vgl. Behrens (1998, S. 2)

Ansatzpunkte ableitbar sind. Statt dessen wird im Anschluss daran ein multikriterielles Beschreibungsraster entwickelt, das eine qualitative Bewertung der Dispersion eines Stoffs unter explizitem Einbezug der Zielsetzung ermöglichen soll.

4.1.1 Quantitative Ansätze zur Beschreibung der Dispersion

4.1.1.1 DIE ENTROPIE ALS MAß ZUR BESCHREIBUNG DER UNORDNUNG

Entropie ist ein Begriff, der im Zusammenhang mit der Etablierung der Thermodynamik als physikalischer Disziplin eingeführt wurde. Die Ursprünge der Thermodynamik gehen dabei auf das 19. Jahrhundert zurück, als mehrere Wissenschaftler die Wirkweisen im Zusammenhang mit Dampfmaschinen untersuchten¹⁴⁸ und begannen, Wärme als eigene Energieform zu begreifen. Als eigenständiger Zweig der Physik war die Thermodynamik spätestens 1850 etabliert, als Clausius den zweiten thermodynamischen Hauptsatz formulierte, das Gesetz der Nichtabnahme der Entropie in einem geschlossenen System. Darauf aufbauend leisteten Maxwell, Gibbs, Planck und Poincaré mit ihren Definitionen etwa zur Temperatur oder ihren Notationen zur Veränderung der Energie, ausgedrückt als Produkt einer intensiven Größe (Temperatur) mit der Veränderung einer extensiven Größe (Entropie), wesentliche Beiträge. 1918 formulierte Nernst das dritte thermodynamische Gesetz (Beziehung zwischen Entropie und absolutem Nullpunkt), die Gültigkeit eines vierten thermodynamischen Gesetzes, das Georgescu-Roegen 1981 mit der Unmöglichkeit des vollständigen Recycling formulierte¹⁴⁹, wird jedoch weithin bestritten¹⁵⁰.

Der zentrale erste Hauptsatz der Thermodynamik konstatiert, dass Energie in einem isolierten System konstant ist¹⁵¹. Dies hat zur Folge, dass keine Energie erzeugt werden kann (Unmöglichkeit des Perpetuum Mobile), aber auch, dass eine Maschine, die Arbeit verrichtet, immer Energie aus einer Energiequelle benötigt. Der wesentliche Unterschied zur Mechanik liegt aber im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik begründet, der die Form der im System gespeicherten Energie berücksichtigt und gleichzeitig die Irreversibilität von Vorgängen beschreibt. In ihm wird ausgesagt, dass es keine thermodynamische Zustandsänderung gibt, deren einzige Wirkung in der vollständigen Umwandlung von Wärme in Arbeit besteht¹⁵². Damit wird ausgesagt, dass es ein Perpetuum mobile zweiter Art, eine Maschine, die Wärme vollständig in Arbeit transformiert, nicht gibt. Formal handelt es sich bei der Entropie S um einen Spezialfall der Gibbs'schen Fundamentalform:

$$(1) \quad dS \geq \frac{\partial Q}{T}$$

Die Verknüpfung zwischen der Energie U und dem Wärmeinhalt Q , der bei konstantem Druck in einem Behälter freigesetzt werden, wird über $S = U + pV$ hergestellt (Druck p , Volumen V). Daraus folgt folgende Beziehung zwischen Energie und Entropie:

$$(2) \quad dU = T dS - p dV$$

¹⁴⁸ vgl. hierzu die Untersuchungen von Carnot zur Bestimmung der Optimalitätskriterien bei der Umwandlung von Wärme in Arbeit

¹⁴⁹ vgl. Georgescu-Roegen (1981, S. 60)

¹⁵⁰ vgl. hierzu die Kritik von Binswanger (1992, S. 114 f.), Ayres/Kneese (1989, S. 103 ff.), Söllner (1996, S. 126)

¹⁵¹ vgl. z.B. Faber et al. (1995, S. 79), Bennewitz (1996, S. 17), Söllner (1996, S. 62)

¹⁵² vgl. Söllner (1996, S. 62). In der klassischen Formulierung von Max Planck lautet dieser Satz: „Es ist auf keinerlei Weise möglich, einen Vorgang, in welchem Wärme durch Reibung entsteht, vollständig rückgängig zu machen.“

Die infinitesimale Änderung der Energie wird beschrieben durch den Anteil der Entropieänderung bei gegebener Temperatur und den Einfluss des Drucks. Die Bedeutung dieser Zerlegung wird im Rahmen der statistischen Entropie weiter unten diskutiert.

Hieraus folgt, dass die Entropie in einem geschlossenen System nicht abnehmen kann. Sie bleibt nur für ideale, reversible Prozesse gleichbleibend. Bereits bei Carnot wurde deutlich, dass der Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen dann am größten ist, wenn die Temperaturdifferenz zwischen zwei Systemen maximal groß ist. Diese Differenz kann benutzt werden, um Arbeit zu verrichten. Nach dem Ausgleich der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Systemen ist jedoch keine freie Energie in Form von Wärme mehr vorhanden, mit deren Hilfe sich Arbeit erzeugen ließe. Aus diesem Grund kann es keine echten Energiekreisläufe geben, da die „Wertigkeit“ der Energie mit jeder Verwendung nachlässt. Dies drückt sich in einer anderen Formulierung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik aus, wonach die Entropie in einem geschlossenen System zu einem Maximum tendiert. Ist dieses Maximum erreicht, befindet sich das System im thermodynamischen Gleichgewicht.

In Ergänzung zu dieser phänomenologischen Beschreibung der Thermodynamik durch Makrogrößen wie Temperatur und Entropie wurde von Boltzmann die statistische Entropie auf Grundlage der Mikrostruktur begründet, die die Entropie aus einer Verteilung von Teilchen im Raum ableitet. Der sich aus verschiedenen Mikrostrukturen zusammensetzende Makrozustand lässt sich mit Hilfe des Entropiebegriffs beschreiben, da die Entropie abnimmt, je wahrscheinlicher eine Verteilung ist. Die Entropie misst einem System mit hohen Zustandswahrscheinlichkeiten eine niedrige Entropie bei.

Als Beispiel wird hierfür der Fall eines idealen Systems aus zwei Kammern und einem zwischenliegenden Ventil betrachtet, in dem eine Kammer mit Gas gefüllt ist, während die andere entleert ist¹⁵³. Das System ist abgeschlossen, tauscht also keine Energie mit der Umgebung aus. Unter der Annahme, dass das universelle Gasgesetz

$$(3) \quad p \cdot V = N \cdot R \cdot T^{154}$$

gilt, und der Zugrundelegung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik ($dU = 0$) kann Gleichung (2) wie folgt formuliert werden:

$$(4) \quad dU = T dS - p dV = T dS - \frac{N \cdot R \cdot T}{V} dV = 0$$

Durch Integration ergibt sich dann:

$$(5) \quad N \cdot R \cdot \int_{V_1}^{V_1+V_2} \left(\frac{1}{V}\right) dV = \int_{V_1}^{V_1+V_2} dS$$

$$(6) \quad N \cdot R \cdot (\ln(V_1 + V_2) - \ln(V_1)) = S(V_1 + V_2) - S(V_1)$$

Die linke Seite der Gleichung ist streng positiv, da V_1 positiv und die Logarithmus-Funktion streng monoton wachsend ist. Also folgt, dass

$$(7) \quad S(V_1) < S(V_1 + V_2)$$

Es tritt also eine Entpieerhöhung durch die Vermischung ein.

¹⁵³ vgl. hierzu Faber et al. (1995, S. 85 f.)

Die Entropie wird aufgrund der Eigenschaften der statistischen Verteilung der Moleküle häufig als Synonym für eine Ordnung bzw. im Falle hoher Entropie als ein System der Unordnung verstanden. Diese Sichtweise trägt jedoch wesentlich zur Kritik an der Verwendung des Entropieansatzes zur Beschreibung von umweltökonomischen Sachverhalten bei. Es ist nämlich gerade nicht der umgangssprachliche Ordnungsbegriff, der mit der Zu- oder Abnahme von Entropie einhergeht. So ist Ordnung ein zutiefst subjektiver Begriff, der mit den eigenen Wertanschauungen verknüpft ist. Selbst im Modellfall der idealen Gase kann die Ausdehnung des Gases in das Vakuum subjektiv als größere Ordnung aufgefasst werden, da nun sinnvollerweise beide Behälter gefüllt sind. Im Wirtschaftssystem ist eine Weiterentwicklung des Systems, intuitiv als Zunahme der Ordnung aufgefasst, möglich, obwohl gleichzeitig die Entropie dieses Systems zunimmt.

Faber et al. diskutieren die Anwendung des statistischen Entropiekonzepts auf Aspekte des Rohstoffverbrauchs¹⁵⁵, die durch Anwendung der Entropienotation gegenüber dem Materialbilanzansatz die Problematik abnehmender Konzentrationen berücksichtigen. Dabei wird Rohstoffen mit hohen Konzentrationen eine niedrige Entropie zugeordnet, Rohstoffen mit niedriger Konzentration umgekehrt eine höhere Entropie. Da mit zunehmender Ausbeutung von Rohstoffen ihre durchschnittliche Konzentration abnimmt, steigt folglich die Entropie mit der Zeit an. Eingebettet in eine Wohlfahrtsfunktion mit verschiedenen Sektoren unter Einbeziehung des Recyclingsektors und der Umwelt lässt sich somit ein Maximierungspfad in Abhängigkeit der Entwicklung der Ressourcenkonzentration beschreiben¹⁵⁶.

Söllner hat den Ansatz zur Verwendung des Entropiekonzepts in der Ressourcenökonomie kritisch beleuchtet¹⁵⁷. Er kritisiert, dass die berechneten Energieaufwendungen auf Grund des Entropieansatzes, der ja in Anlehnung an ideale Gase erstellt wurde, um den Faktor 10 bis 100 zu niedrig sind. Ferner kritisiert er, dass wesentliche Eigenschaften des Entropiekonzepts – nämlich das Phänomen der Irreversibilität und der Entwertung der Energie – nicht berücksichtigt wurden, sondern statt dessen nur auf die Durchmischung von Stoffen abgestellt wurde. Die Annahme, Recycling sei grundsätzlich möglich, wird zwar von der thermodynamischen Theorie gedeckt, ist jedoch in der Praxis, insbesondere im Hinblick auf die Energie, nicht realistisch. Behrens formuliert einen dritten Kritikpunkt, indem er darauf verweist, dass nicht nur die Durchmischung eine Entropieerhöhung bewirkt, sondern dass im allgemeinen ablaufende chemische Reaktionen und Bewegungen ebenso eine Erhöhung der Entropie zur Folge haben können¹⁵⁸.

Aber auch Faber et al. haben ihrerseits die Probleme bei der Anwendung des Entropieansatzes für umweltökonomische Fragestellungen erkannt. So schränken sie die Aussagefähigkeit ihrer Untersuchungen zur Beschreibung der Umweltverschmutzung mit Hilfe der Entropienotation, aus der eine Schadensfunktion abgeleitet wurde¹⁵⁹, ein, indem sie feststellen, dass zusätzlich zur Zunahme der Unordnung (Entropieerhöhung) auch die spezifische Schadwirkung einer Umweltverschmutzung berücksichtigt werden muss und darüber hinaus selbst bei

¹⁵⁴ Hierbei gilt: N = Anzahl der Mole in einem Behälter, T = absolute Temperatur in °Kelvin, R = universelle Gaskonstante

¹⁵⁵ Faber et al. (1995, S. 104 ff.)

¹⁵⁶ Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Ruth (1995, S. 197-213) bei der Bestimmung optimaler Kupfer- und Bauxitabbauaufpade. Er beschreibt eine dynamische Wohlfahrtsmaximierungsfunktion, die den technologischen Fortschritt mit berücksichtigt, der aufgrund der sich verändernden Rohstoffkonzentrationen im Laufe der Zeit ergibt.

¹⁵⁷ vgl. Söllner (1996, S. 128 f.)

¹⁵⁸ vgl. Behrens (1998, S. 123)

¹⁵⁹ vgl. Faber et al. (1987, Kapitel 3.9) basierend auf Überlegungen von Kümmel

Konsens hinsichtlich der Schadwirkung eine Einbettung in eine Wohlfahrtsfunktion hergestellt werden muss¹⁶⁰.

Die Anwendung thermodynamischer Überlegungen auf die Darstellung der Dispersion von Stoffen besitzt einige Vorteile, die jedoch eher genereller Natur sind¹⁶¹:

- Ökonomen werden zwangsläufig mit der Tatsache der Unumkehrbarkeit von Vorgängen konfrontiert, die ihre Zuspitzung in der äußerst pessimistischen Haltung von Georgescu-Roegen findet.
- Verknüpfung von Umweltökonomie und Ressourcenökonomie durch Integration von Versorgungs- und Entsorgungsproblematik (Problem der abnehmenden Rohstoffkonzentration vs. Notwendigkeit der konzentrierteren Behandlung von Abfällen).
- Integration umweltökonomischer Ansätze in klassische wohlfahrtsökonomische Betrachtungen. Dadurch werden Akteure in ökonomischen Systemen motiviert, Optimierungen ihrer eigenen Handlungen vorzunehmen.

Die mit der Entropienotation einhergehenden Probleme sind jedoch schwerwiegend und führen letztendlich dazu, diesen Ansatz zu verwerfen:

- Der (Un-)Ordnungsbegriff ist nicht objektiv auf Fragen des Wirtschaftslebens übertragbar. So kann eine Entmischung von Materialien (entsprechend niedrigere Entropie) zwar gewollt sein, gleichzeitig kann sie aber in Einzelfällen auch ungünstige Eigenschaften haben (z.B. Entfernung von Zusatzstoffen aus Benzin).
- Auf der Basis des Entropieansatzes ist keine eigene Werttheorie möglich. Die Entropie eignet sich bestenfalls im Sinne einer naturwissenschaftlichen Rahmenbedingung als makroökonomischer Ordnungsrahmen.
- Es wäre erforderlich, die Systemgrenzen genau zu beschreiben, um ein geschlossenes System zu erreichen. Letztendlich stellt der gesamte ökonomische Prozess jedoch durch den dauernden Austausch von Energie und Materie ein offenes System dar.
- Die Entropienotation bezieht sich auf wenige idealtypische Fälle wie etwa Gase. Das universale Gasgesetz liefert den entscheidenden Beitrag zur konkreten Berechnung der Entropiedifferenzen. Ohne diese Zusatzinformation ist eine Berechnung nicht möglich, weswegen sich eine breite Anwendung auf reale Vorgänge ausschließt.
- Absolut errechnete Entropieveränderungen sind auch hinsichtlich ihrer Größe ohne Bezug zu anderen Größen (vergleiche die Problematik der um den Faktor 10-100 zu niedrigen Energieeinsätze bei der Extraktion von Ressourcen).

Für die Anwendung auf die Beschreibung der Dispersion von Baustoffen im Stofflager und in den Stoffströmen ist der Ansatz der Entropie insbesondere auf Grund des ersten Einwands einer fehlenden Wertordnung nicht einsetzbar. Dies zeigt sich am Beispiel des Zements, wo zwar die Durchmischung und die Einbettung von Schwermetallen sehr hoch ist, gleichzeitig aber damit ein Wert verbunden ist. Zudem ist die Konzeption der Entropie sehr aufwändig, ferner kann das Misch- und Trenninteresse nicht adäquat berücksichtigt werden.

¹⁶⁰ vgl. Faber et al. (1995, S. 124)

¹⁶¹ vgl. Faber et al. (1995, S. 124)

4.1.1.2 DER DURCHMISCHUNGSGRAD NACH BEHRENS

Behrens versucht in seinem Ansatz, die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Entropienotation, insbesondere hinsichtlich der geringen Aussagefähigkeit der errechenbaren Werte, aufzugreifen und mit dem Durchmischungsgrad ein Maß zu entwickeln, das auf maß- bzw. integrationstheoretischen Erwägungen basiert¹⁶².

An jedem Punkt x in einem dreidimensionalen Einheitswürfel mit gleichen Kantenlängen kann ein Gemisch G angetroffen werden, das sich aus $n+1$ Komponenten s_0, \dots, s_n zusammensetzt, von denen jede einen Anteil p_i im Stoffgemisch besitzt. Der Würfel lässt sich außerdem in m Teilbereiche (Phasen) separieren, in denen die Verteilung der p_i identisch ist. Dies führt zu Sonderfällen wie dem vollständig homogenen Würfel mit genau einer Phase oder dem vollständig separierten Würfel, in dem in jeder Phase genau eine Komponente den Anteil $p_i = 1$ besitzt. Allgemein gilt als durchschnittlicher Anteil einer Komponente im gesamten Würfel die Formel $\overline{p_i} = \int p_i(x) dx$. Daraus lässt sich der Trenngrad eines Gemisches bezüglich seiner Komponenten s_0, \dots, s_n berechnen, der sich als Summe der Abweichungen der Komponentenanteile von ihren jeweiligen Mittelwerten ergibt.

$$(8) \quad T = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^n \int_W \frac{|p_i(x) - \overline{p_i}|}{p_i} dx$$

Ein Trenngrad $T = 0$ bedeutet, dass die Komponenten vollständig homogen vermischt sind (die Abweichung in den Phasen vom Mittelwert ist 0), während ein Trenngrad $T = n$ entsteht, wenn die Komponenten vollständig getrennt sind. Das Komplement zum Trenngrad T ist der Durchmischungsgrad D :

$$(9) \quad D = n - T = n - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^n \int_W \frac{|p_i(x) - \overline{p_i}|}{p_i} dx$$

Ein Durchmischung $D = 0$ kennzeichnet eine vollständige Trennung der Komponenten, hingegen ist mit $D = n$ die vollständige Durchmischung bezeichnet.

Der Durchmischungsgrad ist jedoch noch keine im Sinne der Zielsetzung aussagekräftige Größe. Wenn aus einem Stoffgemisch mit drei Bestandteilen (etwa Bauabfall, bestehend aus organischen, mineralischen und metallischen Fraktionen), das den Durchmischungsgrad $D=2$ aufweist, der organische Teil abgetrennt wird, ergibt sich ein Durchmischungsgrad von $D=1$. Gleiches ergibt sich bei der Abtrennung von metallischen Teilen. Dazu wird ein relativer Durchmischungsgrad D_i bezogen auf eine Komponente i bestimmt, der bei vollständiger Vermischung der Komponente im Gemisch den Wert $D_i = 1$, bei vollständiger Trennung den Wert $D_i = 0$ annimmt. Bezogen auf das obige Beispiel Bauabfall ergäbe sich bei der Abtrennung der organischen Bestandteile ein $D_{\text{organisch}} = 0$, $D_{\text{metallisch}} = 1$, $D_{\text{mineralisch}} = 1$; bei Abtrennung der metallischen Elemente entsprechend $D_{\text{organisch}} = 1$, $D_{\text{metallisch}} = 0$, $D_{\text{mineralisch}} = 1$. Mit Hilfe des relativen Durchmischungsgrades lassen sich auch Definitionen für Trenn- und Mischprozesse aufstellen. Ein Trennprozess ist dadurch gekennzeichnet, dass die Summe der relativen Durchmischungsgrade aller Komponenten eines Gemischs vor der Durchführung der Trennung echt größer ist als die Summe aller relativen Durchmischungsgrade nach Anwendung des Trennprozesses. Ein Mischprozess ist genau gegensätzlich definiert. Die

¹⁶² Zu den folgenden Ausführungen vgl. Behrens (1998, S. 129 ff.)

absolute Summe der Differenzen zwischen Ausgangszustand und Zielzustand über alle Komponenten wird als Trenngefälle bezeichnet.

Für konkrete Stoffgemische lässt sich der Durchmischungsgrad jedoch nicht eindeutig angeben. Bereits die Einteilung der Komponenten ist von der Sicht des Betrachters abhängig, gleiches gilt für die Einteilung des in der theoretischen Herleitung als fix betrachteten Einheitswürfels, der den Untersuchungsraum abgrenzt. So ist es beispielsweise bei der Betrachtung von Gipskartonplatten möglich, die Zahl der Komponenten auf 2 zu begrenzen (Gips und Karton), es sind jedoch auch beliebige Erweiterungen hiervon denkbar (z.B. Erweiterung mit Wärmedämmplatten, Zusatz von Glasgittergeweben zum Brandschutz, chemische Zusammensetzung des Gipses, Schadstoffinhalte etc.). Behrens versucht diesem Dilemma zu begegnen, indem er vorschlägt, die Zahl der betrachteten Komponenten so zu wählen, dass sie den Zielsetzungen der Untersuchung entsprechen und das entsprechende Trenn- bzw. Mischinteresse ausdrücken.

Formal ausgedrückt, äußert sich das Trenn- bzw. Mischinteresse in einer bestimmten Zustandsalternative des Vektors der relativen Durchmischungsgrade (D_0, \dots, D_n). Wenn nun also die Zielsetzung ökologisch motiviert ist (Ausschleusung von Schadstoffen aus einem Gemisch), wird man diesen Stoff als Komponente separat erfassen und den Zielzustand so formulieren, dass der relative Durchmischungsgrad der Schadstoffkomponente zu 0 wird. Analog zur Aktivitätsanalyse lassen sich auch für die Vektoren der relativen Durchmischungsgrade die Begriffe der Dominanz und der Effizienz formulieren. So ist ein Vektor bei einem Trenninteresse genau dann dominant, wenn er zur Erreichung aller Ziele den kleinstmöglichen Durchmischungsgrad annimmt. Er ist auch effizient, wenn er von keinem anderen Vektor dominiert wird. Angesichts der Komplexität der realen Aufgabenstellungen und der Vielzahl der zum Teil konkurrierenden Zielsetzungen muss allerdings davon ausgegangen werden, dass es oft mehrere nebeneinander existierende effiziente Zustände gibt.

Über das Verfahren der dominanten und effizienten Vektoren lassen sich auch monetäre Aspekte von möglichen Verfahren in die Betrachtung integrieren.

Der Ansatz der Formulierung des Durchmischungsgrads, wie ihn Behrens angestellt hat, besitzt einige Vorteile:

- Es wird von der rein stofflichen Ebene abstrahiert und eine sozialwissenschaftliche und ökologische Komponente, nämlich die Berücksichtigung von Interessen, eingeführt. Damit gelingt es, eine der wesentlichen Schwächen des Entropiekonzepts, nämlich die fehlende Wertsystematik durch Unklarheit der Ordnung, zu beseitigen.
- Die Offenheit des theoretischen Gerüsts durch die Einführung von variablen Komponenten und unterschiedlichen Phasen macht das Modell flexibel in seiner Anwendbarkeit für unterschiedliche Stoffgemische.
- Es gelingt, eine quantitative Beschreibung des komplexen Sachverhalts Durchmischung einzuführen, die eine Richtschnur für verschiedene Akteursgruppen entlang stofflicher Prozesse darstellt und leicht verständlich ist.

Es gibt aber bei konkreter Anwendung der Berechnung der Durchmischungsgrade einige Schwächen, die die Tauglichkeit des Instrumentariums im Hinblick auf ein Stoffstrommanagement in Frage stellen:

- Die Festlegung von Komponenten und Phasen muss zwangsläufig vage bleiben. Es wird in der konkreten Situation immer wieder zu einer Auseinandersetzung mit der Frage kommen müssen, ob bestimmte Stoffe und Sachverhalte berücksichtigt werden sollen oder nicht.
- Aus der Unspezifiziertheit der Komponentenwahl folgt auch, dass die quantifizierte Skalierung des Terminus Durchmischungsgrad fraglich ist. Es gelingt z.B. somit schlecht, zwischen verschiedenen Produktalternativen zu vergleichen. Auch erlaubt beispielsweise ein Durchmischungsgrad von 4 keine Aussage darüber, ob diese Bewertung günstig oder ungünstig ist.
- Die stoffliche Bewertung von Gemischen, ausgedrückt durch ihren Durchmischungsgrad, muss nicht mit der monetären Bewertung zusammen fallen. Es ist mit der Notation jedoch nicht mehr ersichtlich, welchem Zielkriterium (ökologisch, ökonomisch, sozial) ein Vorrang eingeräumt wurde.
- Auch gehen aus der Systematik der Durchmischungsgrade keine Impulse hervor, welche konkreten Maßnahmen zur Umsetzung eines Stoffstrommanagements im Sinne der Nachhaltigen Entwicklung sinnvoll sein könnten.

4.1.2 Konzeption eines Beschreibungsrasters für die Dispersion

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen deutlich wurde, sind Ansätze für eine quantitative Erfassung von stofflichen Durchmischungen zwar vorhanden, ihre Eignung zur Beschreibung heterogener Lagerbestände bleibt jedoch begrenzt. Insbesondere verkürzt die Einengung auf rein stoffliche Aspekte die Sicht auf die ganzheitliche Perspektive, die im Rahmen des Stoffstrommanagements sowohl für die Zeit als auch für die Akteure und die von ihnen subjektiv vorgenommene Beurteilung erforderlich erscheint.

Um die vielfältigen Faktoren und Zielsetzungen, die mit dem Konstrukt der Materialdispersion beschrieben werden sollen, berücksichtigen zu können, wird auf ein qualitatives Maß zurückgegriffen. Die wesentliche Schwierigkeit liegt in der Unsicherheit über die Aussagekraft der Bewertung angesichts der Veränderlichkeit der Einflussfaktoren im Zeitablauf bis zum Zeitpunkt der letztendlichen Entsorgung sowie in einer möglichst objektiven Klassifizierung der Bewertung angesichts verschiedener schwer vergleichbarer Einflussfaktoren.

Mit Hilfe des Beschreibungsrasters sollen folgende Überlegungen und Zielsetzungen integriert werden:

- Bezug zu aktuellen, konstruktiv beeinflussbaren Aspekten der Produktgestaltung, um die Demontage- und Recyclingeignung der gegenwärtig in den Lagerbestand eingebrachten Produkte bewerten zu können. Somit können alternative Produktentwürfe hinsichtlich ihres Einflusses auf den Dispersionsgrad verglichen und konkrete Ansätze für eine Produktoptimierung identifiziert werden.
- Berücksichtigung der zeitlichen Unsicherheiten bei der Entwicklung und Bewertung des Lagers durch eine Veränderung von Rahmenbedingungen. Dies betrifft sowohl den weiteren technologischen Fortschritt bei der Bearbeitung von Materialien, die aus dem Lager abgehen, als auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen, etwa in Bezug auf Schadstoffgehalte, Deponierungsverbote und Rückführungsquoten, und ein verändertes Akzeptanzverhalten.

- Integration einer ganzheitlichen Betrachtungsweise, damit ausgehend von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Gebrauch und ggf. Instandsetzung bis hin zur Entsorgung eine Vergleichbarkeit von Produktalternativen hergestellt werden kann. Hiermit sollen die bestehenden Ansätze ergänzt werden, die sich weitgehend auf Demontage- und Recyclingeigenschaften konzentrieren¹⁶³.
- Ausdehnung der Bewertung auf individuell-wahrnehmungsbezogene Aspekte wie etwa die öffentliche Aufmerksamkeit oder die Aktualität. Es ist in letzter Zeit verstärkt festzustellen, dass die Gesellschaft auf bestimmte Themen temporär sensibler reagiert¹⁶⁴.
- Gleichwertige Gewichtung von ökonomisch-messbaren (quantitativen) und schwer-messbaren qualitativen Zielsetzungen, etwa in den Bewertungsdimensionen ökologische Eignung oder „technologisches“ Potenzial.

Eine Kategorisierung der bereits erstellten Ansätze zur Bewertung von technischen Produkten unter besonderer Beachtung des Stoffstrommanagements kann nach folgenden Aspekten vorgenommen werden:

- Umfang des Betrachtungshorizonts (nur Demontage, Demontage und Recycling, gesamter Lebenszyklus).
- Verfahren der Bewertung (subjektiv-heuristisch, Aggregation qualitativer Bewertungen, quantitative Optimierungsrechnung).
- Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik etwa durch technischen Fortschritt in der Werkstoffwahl und der Verfahrenstechnik, Verhaltensänderungen oder ordnungsrechtliche Eingriffe.

Die wesentliche Schwierigkeit bei der vorliegenden Betrachtung liegt in der Unsicherheit über die Aussagekraft der Bewertung angesichts der Veränderlichkeit der Einflussfaktoren im Zeitablauf bis zum Zeitpunkt der letztendlichen Entsorgung. Diese Problematik findet sich auch bei Methoden des Life Cycle Assessment wie z.B. in Ökobilanzen, wieder¹⁶⁵, die zwar einen umfassenden ganzheitlichen Ausgangspunkt besitzen und damit wertvolle Hinweise für eine recyclinggerechte Produkt- oder Prozessgestaltung geben, aber Kriterien der Entsorgung und des Recycling unter heutigen Gegebenheiten bewerten. Diese integrierenden Ansätze eignen sich somit eher für kurzlebige Güter, bei denen die Verzögerungszeit zwischen Produktentstehung und Produktentsorgung kurz ist und die Unsicherheit in der Prognose über Ausmaß und Zeitpunkt des Abfallstroms eher gering ist.

Andere Ansätze betrachten statt einer umfassenden Sichtweise gezielt nur die Demontagephase und entwickeln hierfür Algorithmen für eine nach vorher festgelegten Optimierungskriterien (z.B. Minimierung der Kosten oder des Zeitaufwands) günstige Demontage und Zerlegung. Ein Beispiel aus dem Baubereich liefert z.B. Schultmann, der ein formales Modell zur Ablaufplanung bei der Demontage von Gebäuden entwickelt hat, bei dem die Zielsetzung die

¹⁶³ vgl. hierzu die Zusammenstellung in Hartel (1997, S. 29)

¹⁶⁴ Sensible Reaktionen der Öffentlichkeit waren etwa beim Formaldehyd, oder in anderer Form bei der Atomkraftproblematik festzustellen.

¹⁶⁵ Es gibt unterschiedliche Definitionsansätze. Während etwa Rapp und Schönborn (Rapp/Schönborn 1994, S. 5 ff.) den Begriff Ökobilanz synonym zur Definition des Life-Cycle Assessment gemäß SETAC (SETAC 1993) setzen (also bestehend aus den vier Schritten Zieldefinition, Aufnahme des Ökoinventars, Bewertung des Ökoinventars, Ableitung von Maßnahmen), verstehen andere Autoren wie etwa Kytzia (Kytzia 1995, S. 9) unter einer Ökobilanz in Anlehnung an UBA nur den engeren Teil der „Inventory Analysis“ (die Erfassung und Darstellung der Stoff-, Energie- und Güterflüsse sowie ergänzende Indikatoren für Umweltbelastungen, die in den Prozessen eines Systems während einer Zeitperiode umgesetzt bzw. ausgelöst werden).

Minimierung der Projektdauer und der Projektkosten darstellt¹⁶⁶. Weitergehende Fragestellungen wie etwa eine Maximierung des Recyclinggrades (bzw. eine Minimierung des Deponierungsbedarfs) oder eine maximale Ressourcenschonung finden darin als Nebenbedingungen Eingang. Die Stärken dieser Ansätze beruhen darauf, dass sie die technologischen und ökonomischen Aspekte deutlicher hervorheben und eher die reale Gegebenheit und Beschaffenheit des Materials berücksichtigen. Sie sind häufig mit einer quantitativen Bewertung in Form einer Optimierungsrechnung verknüpft.

Im folgenden wird zur Beschreibung der Durchmischung eines Stoffes der **Dispersionsgrad** eingeführt. Der Dispersionsgrad ist eine dimensionslose Kennzahl, der die Ausprägungen verschiedener technologischer, ökologischer, ökonomisch und individuell-wahrnehmungsbezogener Kriterien zur Beschreibung der Verteilung eines Stoffes in einem zu untersuchenden Gebiet aggregiert. Als zu untersuchendes Gebiet wird in der Regel ein Produkt gewählt. Der Dispersionsgrad ergibt sich anhand eines Scoring-Modells, bei dem die Ausprägungen der Kriterien auf einer ordinalen Skala von 1 bis 10 qualitativ beurteilt und anschließend mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren aggregiert werden. Bei allen Kriterien beschreibt der Wert 1 die günstigste Ausprägung des Kriteriums, 10 die ungünstigste Ausprägung.

Aufbau und Bedeutung der Kriterien werden im folgenden hergeleitet.

4.1.2.1 TECHNOLOGISCHE KRITERIEN

4.1.2.1.1 Verbindungsstruktur

Mit Hilfe einer Bewertung der Verbindungsstruktur von Materialien kann eine Aussage über den zu erwartenden Aufwand zur Separierung von Teilen und zur Zerlegung in einzelne Zielmaterialien getroffen werden¹⁶⁷. Sie bewertet die konstruktiven Eigenschaften eines Produkts, inwieweit einzelne Komponenten, die weitgehend unverändert abgetrennt werden sollen, mit anderen Komponenten verbunden sind. Als Parameter werden die Art der Verbindung und die Funktion der Verbindung verwendet.

Die Art der Verbindung kann sowohl mechanisch (z.B. über Schraub- oder Steckverbindungen), chemisch (z.B. Verkleben, Verschweißen) als auch über Berührung erfolgen, wobei im letztgenannten Fall die Verbindung durch einfache Wegnahme erfolgen kann¹⁶⁸. Die Bedeutung der Verbindungsstruktur erschließt sich meistens über den Beginn eines Reduktionsprozesses, etwa in Form von Sortier-, Demontage- oder Filterungsprozessen.

Eine Verbindungsstruktur kann für Recyclingaufgaben dann als günstig bezeichnet werden, wenn das Ziel der Zerlegung in verschiedene Komponenten mit möglichst geringem Aufwand erreicht werden kann, von denen mindestens eine Komponente gewünscht wird. Dabei spielt es für die Bewertung der Verbindungsstruktur zunächst keine Rolle, inwieweit die im Rahmen von Recyclingquoten häufig formulierten Ziele Vollständigkeit der Abtrennung und Sortenreinheit der Abtrennung¹⁶⁹ erreicht werden.

¹⁶⁶ vgl. hierzu Schultmann (1998, S. 107 ff.)

¹⁶⁷ Die Bestimmung der (molekularen) Durchmischung einzelner Bestandteile erfolgt über den Parameter Monostruktur. Auch die Durchmischung von Materialien, wie sie etwa bei einem unkontrollierten Abriss eines Gebäudes entsteht oder wie sie auf einer Sortieranlage von Abfallwertstoffen vorzufinden ist, ist nicht Gegenstand der Verbindungsstruktur.

¹⁶⁸ vgl. Hartel (1997, S. 50). Hartel bezeichnet eine mechanische Verbindung als Verbindungskontakt.

¹⁶⁹ vgl. Bilitewski/Härdtle/Marek (1994, S. 324)

Hartel beschreibt eine Klassifizierungssystematik in drei verschiedene Arten von Verbindungen, anhand derer Verbesserungspotenzial für die zukünftige Produktentwicklung abgeleitet werden kann¹⁷⁰:

- Funktionsrelevante Verbindungen, die nur durch Weglassen von Funktionseigenschaften, Bündelung von Funktionen zu einer Komponente oder Änderung von grundsätzlichen Arbeitsmechanismen reduziert werden können.
- Halteverbindungen, z.B. zur Positionierung von Komponenten. Diese Verbindungen sind für die Funktionalität eines Produkts unerheblich.
- kombinierte Verbindungen, die sowohl Funktionsrelevanz besitzen als auch Halteaufgaben wahrnehmen.

Durch konstruktive Maßnahmen zur Reduktion nicht relevanter Halteverbindungen kann die Verbindungsstruktur positiv beeinflusst und der Aufwand zur Separierung dementsprechend reduziert werden.

¹⁷⁰ vgl. Hartel (1997, S. 49)

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	nur Berührungsverbindung, nur Halteaufgaben, Verbindung praktisch aufwandslos lösbar
2	Nur Halteaufgaben mit einfacher Lösbarkeit
3	leicht lösbare mechanische Verbindung, durch alternative Konstruktion ersetzbare Verbindung
4	mit Spezialwerkzeug einfach lösbare mechanische Verbindung, Funktionsrelevanz vorhanden
5	Lösbare mechanische Verbindung, die Expertenwissen erfordert
6	mit erheblichem Aufwand lösbare mechanische Verbindung, die wesentliche Funktionsaufgaben übernimmt
7	chemische Verbindung, die mit Spezialwerkzeug separiert werden kann
8	Lösbare chemische Verbindung, die Expertenwissen erfordert
9	sehr aufwändig zu entfernende chemische Verbindung (verklebt, verschweißt) mit Materialbeeinträchtigungen, nicht konstruktiv ersetzbar
10	Verbindung nicht trennbar

Tabelle 4.2: Ausprägung der Verbindungsstruktur im Hinblick auf den Dispersionsgrad

4.1.2.1.2 Monostruktur

Eine möglichst aufwandsarme sortenreine Erfassung von Materialien im Reduktionsprozess kann genau dann erreicht werden, wenn die Material- und Werkstoffvielfalt des zu reduzierenden Gegenstands minimiert wird. Diese naheliegende Forderung an den Konstruktionsprozess ist bereits vor längerem als sogenannte Einstoffregel formuliert worden¹⁷¹. Um eine sinnvolle Aussage mit dem Begriff der Monostruktur zu erreichen, muss zunächst das Objekt definiert werden, auf den sich die Monostrukturforderung bezieht¹⁷². Sinnvollerweise sollte zunächst versucht werden, möglichst viele Verbindungen¹⁷³ im Vorfeld zu lösen und nur für daraufhin verbleibende Komponenten eine Forderung nach Monostruktur aufstellen. Hierzu bietet sich beispielsweise die Betrachtung der sich auf einer untersten Ebene ergebenden Elemente eines Demontagegraphen an¹⁷⁴, die auf Grundlage der vorherrschenden Technik eine im Sinne der Monostrukturforderung optimale Zerlegung in Komponenten ermöglicht.

¹⁷¹ vgl. Jorden/Weege (1979, S. 381). Die Einstoffregel besagt, dass es primär keine Rolle spielt, welche Materialart eingesetzt wird, sondern dass bei der Produktentwicklung auf eine möglichst geringe Materialvielfalt zu achten ist.

¹⁷² So sollte die Monostruktur eines Bildes nur für die einfach zu lösenden Komponenten (Rahmen, Glas, Rückenplatte, Klammern) betrachtet werden.

¹⁷³ vgl. Kapitel 4.1.2.1.1

¹⁷⁴ vgl. hierzu etwa Spengler, 1994 und Nicolai, 1995. Beide zeigen anschaulich die Verwendung des Prinzips des Demontagegraphen für eine nach Kostengesichtspunkten optimale Zerlegung von Gebäuden.

Nimmt man also die durch mechanische oder adhäsive „chemische“ Verbindungen (wie etwa Verklebung) zusammengefügt Materialgruppen aus, verlagert sich die Betrachtung auf die stoffliche Zusammensetzung des Materials auf molekularer Ebene, also diejenige Ebene, die durch quantitative Ansätze wie Entropie (Materialdurchmischung) oder den Durchmischungsgrad nach Behrens beschrieben werden sollen¹⁷⁵. Beide Ansätze sind zwar in der Lage, eine Darstellung von Vermischungen zu beschreiben und Richtungen für Veränderungen anzugeben, jedoch erweisen sich die quantitativen Beschreibungsraster als in der Praxis ungeeignet, da sie von vielfach idealisierten Vorstellungen ausgehen (Abgrenzung des Untersuchungsobjekts, Annahme geometrischer Modelle wie etwa Würfel mit idealen statistischen Verteilungsmustern zur Objektbeschreibung, häufige Begrenzung auf einige wenige stoffliche Durchmischungen).

Souren greift die für die Praxis häufig ungeeigneten Idealisierung von stofflichen Zusammensetzungen auf und erweitert seine Theorie der betrieblichen Reduktion, deren Grundgerüst auf den drei Prozessen Abtrennung, Hinzufügung und Umwandlung basiert, um die Tatsache, dass in der Praxis die konkrete Zusammensetzung der Redukte häufig unbekannt ist¹⁷⁶. Aus seiner Sicht ist es unabhängig von der physischen Vermischung häufig sinnvoller, eine Klasseneinteilung vorzunehmen, wenn bestimmte Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Zielvorstellungen bestehen (etwa ähnliche ökologische Problematik, ähnliche prozessorientierte Parameter wie Abtrennbarkeit oder Sortenreinheit der Abtrennung). So könnte es beispielsweise sinnvoll sein, verschiedene Kunststoffe zu einer Klasse zusammenzufassen.

Eine günstige Monostruktur der Redukte liegt also nicht nur dann vor, wenn die Einstoffregel befolgt wird, sondern auch dann, wenn der Aufwand für das zu erreichende Ziel sich durch die stoffliche Materialvielfalt nicht verschlechtert. Ein Beispiel hierfür ist Zement, der zwar in seiner Grundstruktur aus einer Vielzahl unterschiedlicher Stoffe besteht, bei dem aber das Ziel einer optimalen Reduktbehandlung durch die Verschiedenheit nicht beeinflusst wird. Zement wäre jedoch dann hinsichtlich seiner Monostruktur ungünstiger zu beurteilen, wenn ein Redukt, das aus Zementen verschiedener Rezepturen besteht, einen speziellen Bearbeitungsaufwand zur Erreichung des Ziels erfordert. Hingegen ist eine gemauerte Innenwand, auf der Gipsputz aufgetragen ist, aufgrund des erhöhten Aufwands zur Separation der Materialien schlechter zu bewerten als eine alternativ einsetzbare Vollgipsplatte.

¹⁷⁵ vgl. Kapitel 4.1.1

¹⁷⁶ vgl. Souren (1996, S. 219)

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	Komponente aus einer Materialart
2	Komponente nicht aus Verbundwerkstoff
3	geringe Einlagerung von fremden Stoffen mit wenig störenden Eigenschaften
4	Legierung mit bekannten Mischungsverhältnissen
5	z.B. Faserverbund-Kunststoff mit thermoplastischer Matrix
6	z.B. Faserverbund-Kunststoff mit duroplastischer Matrix
7	Schwermetallzugabe, z.B. Cadmium im PVC
8	erhebliche Einlagerung von fremden Stoffen
9	sehr aufwändig aufzulösende Matrix
10	nicht auflösbarer Verbundwerkstoff

Tabelle 4.3: Ausprägung der Monostruktur im Hinblick auf den Dispersionsgrad

4.1.2.1.3 Recyclingeignung

Der Parameter Recyclingeignung fasst alle weiteren Aspekte der technologischen und werkstofflichen Gestaltung von Produkten zusammen und bildet ihre Bewertung mit Hilfe eines Scoring-Modells ab¹⁷⁷. Dabei sollen die je nach Betrachtungsweise unterschiedlichen Gewichtungen Berücksichtigung finden.

Es gibt eine Reihe von Publikationen, die sich mit Aspekten und Parametern für eine recyclinggerechte Gestaltung von Produkten auseinandersetzen¹⁷⁸. Am häufigsten finden sich Ansätze, die Kriterien für einzelne Branchen formulieren, z.B. für den Maschinen- und Anlagenbau in der VDI-Richtlinie 2243, für die elektrotechnische Industrie in Papieren des ZVEI formuliert¹⁷⁹. Neben den eher branchenbezogenen Ansätzen finden sich auch Darstellungen, die explizit bestehende Zielkonflikte zwischen Produktherstellung, Produktnutzung und Entsorgung thematisieren¹⁸⁰ (z.B. Langlebigkeit versus Produktinnovation, teure hochwertige Werkstoffe versus Wettbewerbsfähigkeit, Funktionalitätsverzicht versus Sicherheit).

Kreibich stellt einen aus 12 Prinzipien bestehenden Kriterienkatalog des Instituts für Zukunftsstudien und Technikbewertung (IZT) Berlin vor, der als Ergebnis eines mehrjährigen

¹⁷⁷ Ökonomische Parameter auf der „Erfolgsebene“ (vgl. Souren, 1996) sowie ökologische Parameter sind hierbei nicht enthalten, da sie gesondert betrachtet werden sollen (vgl. Kapitel 4.1.3.2 und 4.1.3.3)

¹⁷⁸ Die Zeitschrift Umweltwirtschaftsforum hat diesem Thema ein ganzes Heft gewidmet (UWF Nr. 5, 1994). Hier insbesondere die Beiträge von Schemmer et al., S. 24-30, Landeck, S. 64-67 sowie von Kreibich, S. 13-22

¹⁷⁹ ZVEI (1994)

¹⁸⁰ Zu diesen vergleichenden Ansätzen gehören eine Reihe von Überlegungen im Bereich elektronischer Produkte, etwa bei Angerer u.a., 1993; Breer, 1992; Jorde/Konrad, 1994 sowie in den Bereichen Papier und Glas (vgl. UBA-Analyse von Milchverpackungen). Gerade diese UBA-Analyse zeigt jedoch exemplarisch, dass eine abschließende Bewertung der optimalen Eignung eines Materials trotz einer umfangreichen Analyse nicht möglich ist.

Forschungsprojekts zur umwelt- und entsorgungsfreundlichen Gestaltung von Produkten definiert wurde¹⁸¹:

1. Werkstoffminimierung (Verkleinerung der Produkte, Nutzung der Mikrotechnik)
2. Vermeidung bestimmter Beschichtungen, Zusätzen und Verbundstoffen
3. Schadstoffarme Werkstoffauswahl (Bezug von Vorprodukten nur mit Kenntnis der Inhaltsstoffe sowie weitestgehende Vermeidung von Schwermetallen)
4. Wiederverwendung einzelner Bauteile (Forderung nach leichter Austauschbarkeit)
5. Reduktion von Bauteilen (Standardisierung, Reduktion übertriebener Nutzungsvarianten)
6. Minderung der Werkstoffvielfalt
7. Lebensdauererhöhung (leichte Austauschbarkeit von Bauteilen, Wartungsfreundlichkeit)
8. Demontagefreundlichkeit (Verwendung leicht demontierbarer Verbindungselemente, Vermeidung von Verklebungen)
9. Bauteile- und Gerätekennzeichnung
10. Werkstoffkennzeichnung (möglichst auch automatenlesbar)
11. Recyclingfreundliche Werkstoffe (Vermeidung von Fremdverstärkungen und Beschichtungen)
12. Vermeidung von Verpackungen

Diese Anforderungen, die für die vorliegende Betrachtung in separaten Zielparametern erfasst werden, sind mehrfach erweitert worden, etwa durch die Aufnahme der Akzeptanzebene bei Flatz¹⁸² und die Berücksichtigung der Recyclingform in der VDI-Richtlinie 2243¹⁸³:

- **Wiederverwendung** ist die erneute Benutzung eines gebrauchten Produkts (Redukts) für den gleichen Verwendungszweck wie zuvor, wobei die Gestalt des Redukts erhalten bleibt (z.B. Mehrwegverpackung).
- **Weiterverwendung** ist die erneute Benutzung eines gebrauchten Produkts für einen anderen Verwendungszweck (z.B. Senfglas -> Trinkglas).
- **Wiederverwertung** ist der wiederholte Einsatz von Redukten in einem gleichartigen wie dem bereits durchlaufenen Produktionsprozess (z.B. Metallschrotte, Glas).
- **Weiterverwertung** ist der Einsatz von Altstoffen und Produktionsabfällen bzw. Hilfs- und Betriebsstoffen in einem von diesen noch nicht durchlaufenen Produktionsprozess. Es entstehen Werkstoffe oder Produkte mit anderen Eigenschaften und Verwendungen (z.B. Pyrolyse von Kunststoffen).

Während für Investitions- und Konsumgüter bereits eine Reihe von produktbezogenen Ansätzen zur Formulierung einer recyclinggerechten Konstruktion vorliegen, ist dies im Bereich des Bauwesens bislang kaum der Fall. Bis zu Beginn der 90er Jahre wurde die Diskussion

¹⁸¹ Kreibich (1994, S. 17 ff.)

¹⁸² vgl. Flatz (1995, S. 235)

¹⁸³ vgl. Möller/Jeske (1995, S. 5 ff.)

beherrscht von den Emissionen während des Betriebs von Gebäuden¹⁸⁴. Später wurde begonnen, unter dem Stichwort „Kreislaufwirtschaft im Bauwesen“ den Umgang mit Abbruchmaterial zu diskutieren, wobei Themenstellungen wie Aufbereitungstechniken, Abbruchverfahren und rechtliche Rahmenbedingungen die Diskussion beherrschten¹⁸⁵. Etwa Mitte der 90er Jahre kam eine weitere Sichtweise hinzu, die Potenziale zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen durch eine Planung von Rückbauverfahren sowie eine Verbesserung des Baustellenbetriebs sowohl bei der Erstellung als auch beim Abbruch von Bauwerken identifizierte¹⁸⁶. Ergänzt wird dieser Ansatz von der Forderung an eine bessere Kooperation zwischen den Beteiligten im Bauprozess, etwa Auftraggeber, Planer, Architekten, Bauherren, Bauausführende, Baustoffproduzenten und Baustoffhändler¹⁸⁷.

Die Bedeutung einer umfassenden Recyclingeignung gilt auch für die Konstruktion und Herstellung von Bauprodukten, da hierdurch die Auswirkungen der nachfolgenden Stufen Nutzung und Entsorgung wesentlich beeinflusst werden. Hieraus resultiert die Zielsetzung, dass die Konstruktion der Produkte so gestaltet sein muss, dass die stoffliche Zusammensetzung günstige Voraussetzungen für ein späteres Recycling ermöglicht. Gerade im Baubereich ist hier durch die langen Verweilzeiten und die bisher nur rudimentär vorhandenen konzeptionellen Überlegungen Handlungsbedarf gegeben¹⁸⁸.

Um angesichts der Vielfalt der Bauprodukte ein möglichst breit einsetzbares Verfahren zu erhalten, sollen auf der Grundlage der von Kreibich sowie von Hartel formulierten Kriterien mehrere Faktoren identifiziert und anschließend durch Anwendung eines Scoring-Modells zu einem qualitativen Wert zusammengeführt werden. Das Scoring-Modell ist ein Vertreter der nutzwertanalytischen Bewertungsverfahren, bei denen unterschiedliche, nicht oder schlecht vergleichbare Einflussfaktoren je einzeln auf einer gemeinsamen Ordinalskala bewertet und verknüpft mit Gewichtungsfaktoren zu einem gemeinsamen Wert zusammengefasst werden¹⁸⁹.

¹⁸⁴ Die Diskussion erstreckte sich auf Fragen der Dämmung und Isolierung von Gebäuden, insbesondere im Hinblick auf die Wirksamkeit nachträglicher Maßnahmen bei Altbauten. Ferner betrachtet wurde der Herstellerenergieaufwand für Baustoffe (vgl. hierzu die Arbeit von Marmé, 1979).

¹⁸⁵ vgl. hierzu z.B. Thomé-Kozmiensky (1987); Rahlwes (1993, S. 114 ff.); Kohler (1994); Bilitewski (1992, S. 485 ff.); Brenner/Weibel (1995); Händl (1994)

¹⁸⁶ vgl. hierzu die Arbeiten am Lehrstuhl Industrielle Produktion der Universität Karlsruhe: Rentz et al. (1994); Spengler (1994); Nicolai (1994); Rentz et al. (1997); Schultmann (1998). Ferner die Arbeiten von Andrä et al. (1994 sowie 1995)

¹⁸⁷ vgl. hierzu etwa Gewiese (1998, S. 57)

¹⁸⁸ vgl. Steinhilper (1994, S. 36). Er spricht davon, dass „die Eigenschaften eines Produkts in Bezug auf seine Auswirkungen auf die Umwelt – und damit auch seine Eignung zum Recycling – durch seine Konstruktion maßgeblich mitbestimmt werden.“

¹⁸⁹ Die Literatur zur Nutzwertanalyse ist sehr umfangreich; im vorliegenden Zusammenhang bietet sich z.B. Zangemeister (1976), an, der eine Gruppierung von Einzelkriterien zu Obergriffen vornimmt und somit eine stufenweise Gewichtung ermöglicht (Zielhierarchiemethode).

Bewertungskriterium	Einzelwert	Summenwert
Recyclingfähigkeit		0,6
Entsorgungsweg gem. VDI 2243 ¹⁹⁰	0,2	
Materialkennzeichnung	0,1	
Sortierbarkeit ¹⁹¹	0,2	
Leichte Zugänglichkeit	0,1	
Materialart		0,2
Standardwerkstoff	0,1	
Wertstoffgehalt	0,05	
Schadstoffgehalt	0,05	
Materialeigenschaft		0,2
Materialverträglichkeit	0,1	
Beständigkeit gegen physikalische Einflüsse	0,05	
Beständigkeit gegen chemische Einflüsse	0,05	

Tabelle 4.4: Kriterienliste für die Einschätzung der Recyclingeignung von Bauprodukten

Der in dieser Kriterienliste aufgeführte Wertstoffgehalt (analog hierzu der Schadstoffgehalt) stellt ein Maß für die Produktreinheit dar. Im Gegensatz zur separat genannten Monostruktur beschreibt die Produktreinheit, in welchem Ausmaß Störstoffe im Material enthalten sind (etwa Stabilisatoren, Schwermetalle, Verunreinigungen etc.), die ein Recycling erschweren können. Häufig wird eine Aussage zum Wertstoff- bzw. Schadstoffgehalt stark variieren, da die Zusammensetzung von individuellen Gegebenheiten bei der Produktion (Beschaffenheit der Ausgangsstoffe, Umfeldbedingungen der Produktion, verwendete Rezeptur) sowie von Einflüssen während des Gebrauchs abhängig ist.

¹⁹⁰ Das Kriterium Entsorgungsweg referenziert die vier Kategorien Wiederverwendung, Weiterverwendung, Wiederverwertung und Weiterverwertung. Die Zuordnung zu den Ausprägungsgraden stellt sich in etwa wie folgt dar:

Ausprägungsgrad 1: Wiederverwendung oder Weiterverwendung ohne weitergehende Behandlungsschritte

Ausprägungsgrad 3: Wieder-/Weiterverwendung mit Reinigung oder Prüfung; Wiederverwertung ohne Sortieraufwand

Ausprägungsgrad 5: Wieder-/Weiterverwendung mit Zerlegung, Bearbeitung oder Neubestückung, Wiederverwertung mit sortenreiner Trennung und Klassifizierung sowie Zerkleinerung (z.B. Granulierung)

Ausprägungsgrad 7: Wieder-/Weiterverwertung durch Zerkleinern, Pressen oder chemische Umwandlung (Pyrolyse, Umschmelzen) mit Verunreinigung möglich, jedoch Downcycling

Ausprägungsgrad 9: Nur Weiterverwertung in einer Downcycling-Anwendung begrenzt möglich

Ausprägungsgrad 10: Nicht recyclingfähig

¹⁹¹ Das Kriterium Sortierbarkeit kennzeichnet die technische Möglichkeit der Separierung im späteren Recyclingprozess. Es ist somit abzugrenzen vom ökonomischen Aspekt der Separierungskosten. Eine Zuordnung zu Ausprägungsgraden ergibt folgendes Bild:

Ausprägungsgrad 1: ohne Aufwand / keine Sortierung

Ausprägungsgrad 3: einfache Siebklassifizierung, Schwingeseparator

Ausprägungsgrad 4: Magnetabscheidung

Ausprägungsgrad 6: mehrstufige Siebklassifizierung

Ausprägungsgrad 7: Sinkverfahren, Hydrozyklonverfahren

Ausprägungsgrad 9: Mikrowellensortierung

Ausprägungsgrad 10: Nicht sortierbar

4.1.2.2 ÖKOLOGISCHE KRITERIEN

Die ökologischen Kriterien ergeben sich insbesondere aus den Überlegungen in den Leitbildern des Stoffstrommanagements aus Kapitel 2.2. Entsprechend der Unterschiedlichkeit der einzelnen Ansätze zum Stoffstrommanagement existieren verschiedene Sichtweisen, die deren Zielrichtungen widerspiegeln. Aus dem umfassenden, das gesamte gesellschaftliche und ökologische System betrachtenden Ansatz des Sustainable Development heraus werden, aufbauend auf den vier Grundregeln¹⁹², ökologische Schutz- und Gestaltungsziele sowie daraus ableitbare Bewertungskriterien und Indikatoren formuliert¹⁹³, von denen ein großer Teil auch in die Wirkungskategorien der Life Cycle Assessment Entwürfe nach SETAC Eingang gefunden hat¹⁹⁴. Die Zielsetzungen reflektieren deutlich die ökosystemare und vielfach auf ökotoxikologische Fragestellungen ausgerichtete Sichtweise dieser Konzeption.

Der Themenkomplex der Ökotoxikologie im Baubereich ist immer wieder punktuell aufgegriffen worden¹⁹⁵ und hat zu breiten Diskussionen über die Schadstoffbelastung während der Nutzungsphase von Gebäuden bis hin zu architektonischen und gestalterischen Aspekten eines „gesunden Wohnens“ geführt. Weitergehende ökosystemare Aspekte des Sustainable Development Konzepts wie abiotische Integrität und biotische Stabilität und Funktionserhalt sind bislang nicht auf den Baubereich angewendet worden.

Der deutlichste Bezug zu ökologischen Kriterien bei der Beurteilung des Dispersionsgrads von Baustoffen findet sich in der regional-geogenen Betrachtung von Baccini/Brunner sowie im Leitbild der Abfallwirtschaft¹⁹⁶. Während die Forderung nach einem regional-geogenen Gleichgewicht den Rahmen formuliert, können die konkreten Zielsetzungen der Abfallwirtschaft auch als Kriterien für die ökologische Beurteilung von Produkten herangezogen werden.

<u>Zielsetzung</u>	<u>Ansatzpunkt</u>	<u>abgebildet in</u>
Schutz des Menschen und der Umwelt	- umweltfreundliche Reduktbehandlung - Schadstoffgehalt	technologisches Kriterium Kriterium: Schadstoffgehalt
Schonung der Reserven	- max. Kreislaufführung	Kriterium: Ressourcenschonung
Schonung von Deponievolumen	- max. Kreislaufführung	Kriterium: Ressourcenschonung
Nachsorgefreiheit der Entsorgung	- Keine Beeinträchtigung anderer Stoffe - Aufkonzentration	Kriterium: Deponierfähigkeit

Tabelle 4.5: Herleitung von Bewertungskriterien aus Leitbildern des Stoffstrommanagements

¹⁹² vgl. Kapitel 2.2.1

¹⁹³ vgl. Enquete-Kommission (1994, S. 448 f.)

¹⁹⁴ vgl. SETAC (1992, 1993)

¹⁹⁵ vgl. die Debatten um Formaldehyd in Möbeln sowie die Ausführungen zu Schadstoffen in Baustoffen (ITAS/ifib, 1998, Kapitel 3.3)

¹⁹⁶ Nähere Erläuterungen in Kapitel 2.2.4 bzw. Kapitel 2.2.5

4.1.2.2.1 Deponierfähigkeit

Das Kriterium der Deponierfähigkeit beschreibt, inwieweit ein Stoff bzw. ein Redukt in der Lage ist, das abfallwirtschaftliche Kriterium der Nachsorgefreiheit der Entsorgung zu ermöglichen, sofern andere Behandlungsverfahren wie Produktverwendung, stoffliche Verwertung oder thermische Verwertung nicht möglich sind¹⁹⁷ und die Deponierung als sogenannte letzte Senke herangezogen werden muss. Dabei muss grundsätzlich für jeden Stoff ein sicherer Verbleib sichergestellt werden können. Sollte aus technologischen, ökonomischen oder individuellen Gründen die Deponierung als einzige Behandlungsvariante verbleiben, muss für jedes Redukt die Deponierfähigkeit nachgewiesen werden können, d.h. es muss ein Verfahren existieren, um die Nachsorgefreiheit der Entsorgung sicherstellen zu können.

Eine günstige Einschätzung der Deponierfähigkeit ist dann gegeben, wenn während eines hinreichend langen Betrachtungszeitraums (Jahrhunderte bis Jahrtausende) die austretenden Stoffflüsse die Umwelt nicht beeinträchtigen. Gemäß der Forderung von Brunner soll dieses Ziel genau dann erreicht sein, wenn die anthropogenen Stoffflüsse um mindestens eine Größenordnung kleiner sind als die geogenen Flüsse und diese somit nicht verändern¹⁹⁸. Neben der zwar vorhandenen, aber hier nicht weiter betrachteten Abhängigkeit der Einschätzung der Deponierfähigkeit eines Stoffs von variierenden geogenen Hintergründen ist also für die Deponierfähigkeit die Mobilität der Stoffe auf der Deponie und nicht die Stoffkonzentration ausschlaggebend¹⁹⁹.

Um zu Bewertungen von Redukten zu gelangen, muss zunächst die Deponierfähigkeit von Stoffen untersucht und anschließend betrachtet werden, ob es Verfahren gibt, das Redukt so zu bearbeiten, dass es den aus dem Leitbild der Abfallwirtschaft abgeleiteten Zielsetzungen entspricht. Dies kann in Form verschiedener Ansätze geschehen, neben der Durchführung von Umwandlungsprozessen etwa durch thermische Bearbeitung können Verdünnungsverfahren (Hinzufügen von „unbelastetem“ Material, bis die Konzentration eines Stoffes einen Schwellenwert unterschreitet), Separierungsverfahren oder gezielte weitere Bearbeitungsschritte erfolgen (z.B. immobile Einbindung eines Stoffes in eine Zementmatrix).

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	Redukt erfüllt ohne weitere Bearbeitung das Kriterium der Nachsorgefreiheit
2	Schadstoff auf lange Sicht immobil eingebunden
3	Nachsorgefreiheit im großen und ganzen gewährleistet
4	Bei laufender Beobachtung der Stoffflüsse ist Deponierung möglich
5	Es ist eine weitere Behandlung des Redukts und Zerlegung in einzelne Stoffe erforderlich
6	Es ist eine Einbindung des Redukts in eine immobile Matrix erforderlich

¹⁹⁷ Die thermische Verwertung ist für mineralische Bauabfälle ohnehin kein möglicher Entsorgungspfad und kommt höchstens für brennbare Materialien wie etwa Baustellenabfälle und Holz in Betracht.

¹⁹⁸ vgl. Glenck et al. (1997, S. 22)

¹⁹⁹ Beim Zement zeigt sich exemplarisch die Bedeutung der Mobilität der Stoffe für die Einschätzung der Deponierfähigkeit, da Zement die Eigenschaft besitzt, Stoffe nicht mobilisierbar in seine Matrix einzubinden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich diese Einschätzung bei einer weitergehenden Aufspaltung des Zements in seine Bestandteile wieder ändern kann, da die Stoffe hierbei wieder freigesetzt werden könnten.

Ausprägungsgrad	Ausprägung
7	Einzelne Stoffe sind unter ungünstigen Voraussetzungen auf der Deponie mobilisierbar
8	Redukt kann nur unter besonderer Bewachung deponiert werden
9	Von einzelnen Stoffen im Redukt geht ein Gefährdungspotenzial auf der Deponie aus
10	Redukt ist nicht nachsorgefrei deponierbar

Tabelle 4.6: Ausprägung der Deponierfähigkeit im Hinblick auf den Dispersionsgrad

4.1.2.2.2 Ressourcenschonung

Das Kriterium der Ressourcenschonung soll vier Dimensionen erfassen²⁰⁰:

- die Substitution von Primärmaterialien
- die Einsparung von Primärmaterialien
- die Schonung von Deponieraum
- die Einsparung von Energie durch die Verwendung von Sekundärmaterialien statt von Primärmaterialien sowie durch die Nutzung der chemisch gebundenen Energie durch thermische Verwertung

Ein Produkt soll dann günstig im Kriterium Ressourcenschonung versehen werden, wenn es eine Kreislauflührung in möglichst großem Umfang²⁰¹ auf möglichst der gleichen Ebene ermöglicht (Vermeidung von Downcycling). Dabei sind sowohl die konstruktive Ebene angesprochen (Herstellung eines Produkts aus Sekundärmaterialien, das den Anforderungen im vollen Umfang genügt), als auch Herausforderungen für die abfallwirtschaftliche Seite formuliert, um die Möglichkeiten zur Wieder- und Weiterverwertung zu erhöhen.

Ebenfalls zur Ressourcenschonung gerechnet werden Aspekte der Lebensdauer von Produkten. Die Konstruktion von langlebigen Produkten verringert die Menge der in der Anthroposphäre umgeschlagenen Ressourcen und trägt somit zumindest zu einer Ressourcenstreckung, angesichts parallel laufender technologischer Fortschritte jedoch vermutlich auch zu einer Ressourcenschonung bei.

Hinsichtlich der Schonung von Deponieraum ist dann eine günstige Bewertung vorzusehen, wenn es aufgrund der Beschaffenheit des Redukts gelingt, eine volumenminimale Ablagerung zu erreichen (z.B. durch thermische Verwertung, Kompaktieren, Schreddern etc.). Allerdings steht dieses Kriterium häufig in einem Spannungsfeld zum oben genannten Kriterium der Deponierfähigkeit, die häufig aus ökologischen Gründen eine bewusste Separierung von Stoffen fordert.

Der Vergleich der Einsparung von Energieressourcen ist häufig nur sehr aufwändig zu führen. Einer vollständigen energetischen Bilanzierung der Herstellung aus Primärmaterialien

²⁰⁰ vgl. Glenck et al. (1997, S. 20)

²⁰¹ zu Einschränkungen der Kreislauflührung vgl. Kapitel 2.3.1

(beginnend von der Rohstoffgewinnung über die Rohstoffaufarbeitung bis hin zur Produktherstellung) muss der erforderliche Energieaufwand zur Sortierung und Separierung sowie zur Aufarbeitung des Redukts gegenübergestellt werden. Exemplarisch haben Möller/Jeske vergleichende Untersuchungen für die Behandlung von PVC- und PE-Redukten (Wiederverwertung, thermische Verwertung, Deponierung) durchgeführt und ermittelt, dass die Ressourcenstreckung hinsichtlich des Material- und Energieeinsatzes bei einer Deponierung von 10 % des Materials um den Faktor 2-3, hinsichtlich des benötigten Deponievolumens um den Faktor 6-8 möglich ist²⁰².

Für mineralische Materialien relevant ist die Einschätzung der Substitution und der Einsparung von Primärmaterialien durch eine lange Lebensdauer sowie die Betrachtung der energetischen Bilanz bei der Herstellung der Produkte. Untersuchungen weisen darauf hin, dass z.B. das Recycling von Zement mit Hilfe der elektrodynamischen Fragmentierung von Beton und der damit einhergehende Verzicht auf den energieintensiven Herstellprozess im Drehrohrofen eine positive Energiebilanz aufweist²⁰³.

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	Langlebiges Produkt, das ohne Aufwand wiederverwendet werden kann
2	Geringer Aufwand zur Wiederverwendung
3	Wiederverwendung mit Aufwand möglich
4	Komplette Wiederverwertung mit Aufwand möglich
5	Teile des Redukts können einer neuen Nutzung zugeführt werden oder sind thermisch verwertbar
6	Verwertung eines Teils mit Aufwand möglich, aber für kürzere Lebensdauer
7	Verwertung aufwändig und nur für einen geringerwertigen Einsatz möglich (Downcycling)
8	Verwertung sehr aufwändig und auf absehbare Zeit nicht rentabel
9	Kurzlebiges Produkt, das nur in geringem Umfang für einen niederwertigeren Einsatz genutzt werden kann
10	Kurzlebiges Produkt, das deponiert werden muss

Tabelle 4.7: Ausprägung der Ressourcenschonung im Hinblick auf den Dispersionsgrad

²⁰² vgl. Möller/Jeske (1995, S. 41)

²⁰³ vgl. Stemmermann (1998, S. 18) sowie Andrä et al. (1994, S. 121), die den Energieaufwand zur Herstellung eines Wärmedämmstoffs aus Primärmaterial um bis zu 30-fach höher beziffern als bei einer Aufarbeitung und Herstellung aus Sekundärstoff. Dennoch betrachten die meisten Untersuchungen den Vergleich des Energieaufwands zwischen Gebäudeherstellung und Gebäudenutzung. Bei einer 80 jährigen Nutzungsdauer schwanken die Angaben hier je nach Gebäudetyp zwischen 1000 und 1500 kWh / qm Wohnfläche an Herstellerenergieaufwand, während für die Nutzung 30000-40000 kWh / qm Wohnfläche angenommen werden. Der Herstellerenergieaufwand liegt regelmäßig zwischen 3 und 4 % des zurechenbaren Nutzerenergieaufwands. (vgl. Ebel et al., 1996, S. 55)

4.1.2.2.3 Schadstoffgehalt

Das Kriterium des Schadstoffgehalts soll diejenigen Produkte und Redukte mit einer günstigen Bewertung kennzeichnen, bei denen der Gehalt an Schadstoffen bezogen auf die gesamte Produktmasse gering ist. Ferner können diejenigen Produkte, bei denen die Schadstoffe nicht mobilisierbar im Gefüge eingebunden sind, mit einer günstigen Bewertung versehen werden (z.B. Schadstoffe in der Zementmatrix)²⁰⁴.

Als Schadstoff sollen dabei zunächst alle diejenigen Stoffe angesehen werden, von denen ein Gefährdungspotenzial für die menschliche Gesundheit ausgeht, sei es unmittelbar durch Direktinkorporationen im Körper oder mittelbar, etwa im Falle der Luftverschmutzung, der Wasserverschmutzung, durch Anreicherung in der Nahrungskette oder langfristig durch Schäden, die z.B. durch den Treibhauseffekt hervorgerufen werden.

Vom Schadstoff abzugrenzen ist der Begriff des Störstoffs²⁰⁵ in einem Produkt. Hierbei handelt es sich um einen Stoff, der im Materialgefüge eines Produkts eingelagert, für dessen Herstellung oder Gebrauch aber nicht erforderlich ist. Von ihm gehen zunächst keine Gefährdungen der menschlichen Gesundheit aus. Die Störstoffe sind jedoch dazu geeignet, etwa die Recyclingeignung von Redukten z.B. durch Verminderung der Stabilität oder Festigkeit zu verringern oder aber die Deponierfähigkeit von Material zu beeinträchtigen²⁰⁶.

Es existieren jedoch auch fließende Übergänge zwischen beiden Begriffen, da ein Gefährdungspotenzial häufig subjektiv wahrgenommen wird (etwa die Geruchsbelästigung durch Schwefel) oder sich Erkenntnisse über die Schadwirkung eines Inhaltsstoffes sich erst später herausstellen (etwa die Diskussion über Asbest, das von einer Bewertung als Baustoff mit günstigen Eigenschaften in den 60er Jahren seit den 80er als krebserregend eingestuft wird).

Die Diskussion um den Schadstoffgehalt und davon ausgehend um die toxische Wirkung von Schadstoffen auf die menschliche Gesundheit nimmt seit geraumer Zeit auch bei Baustoffen breiten Raum in der Diskussion ein. Ein großer Teil der Publikationen befasst sich hierbei mit Gefährdungen, die während der Nutzung von Gebäuden von organischen Verbindungen etwa in Lösemitteln, Farben, Lacken, Beschichtungen und Klebstoffen ausgehen sowie mit dem Umgang der früher eingesetzten Stoffe Asbest, PCB und FCKW²⁰⁷.

In jüngster Zeit steigt aufgrund der zunehmenden Auseinandersetzung mit der Aufbereitung von Baurestmassen für eine erneute Wiederverwertung auch die Betrachtung der Stoffflüsse wichtiger Schad- und Störstoffe, einerseits, um Qualitätsanforderungen an Recyclingbaustoffe sicherzustellen²⁰⁸ und andererseits, um den Verbleib von Schadstoffen im Prozess der Aufarbeitung zu verfolgen²⁰⁹.

²⁰⁴ vgl. Glenck et al. (1997, S. 22 f.) „Es gibt keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem gesamten Stoffgehalt [...] und den zu erwartenden Stoffkonzentrationen im Sickerwasser. [...] Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass die vorhandenen Stoffkonzentrationen in Baurestmassen als Maß für das Gefährdungspotenzial herangezogen werden können.“

²⁰⁵ Synonym wird in der Literatur auch der Begriff „Problemstoff“ benutzt (vgl. Enquête-Kommission, 1994, S. 317)

²⁰⁶ Eine ausführliche Diskussion über die Begriffe Schadstoff und Störstoff findet sich bei ITAS/ifib (1998, S. 156 f.)

²⁰⁷ vgl. hierzu z.B. Enquête-Kommission (1994), BUWAL (1995), Weibel/Stritz (1995), ITAS/ifib (1998)

²⁰⁸ z.B. Gewiese (1998, S. 82 ff.), Hiersche/Wörner (1990); Kohler (1997, S. 36)

²⁰⁹ Schachermayer et al (1996, S. 31): Es zeigt sich zum Beispiel eine Abreicherung metallischer Stoffe in den Produkten, die anschließend im Abwasser angereichert werden. Diese Untersuchungen beeinflussen auch die Ansätze, wie mit Cd-belasteten PVC-Rohren verfahren werden soll (Wiederverwendung versus Aufbereitung und Ausschleusung des Cadmiums).

Grundsätzlich gilt für alle Baustoffe, dass in letzter Zeit die Zahl der eingesetzten Zusatzstoffe zur Erzielung bestimmter Eigenschaften stark zugenommen hat. Dies lässt beim Abbruch in einigen Jahrzehnten eine Erhöhung des Schad- und Störstoffgehalts von Bauabbruch erwarten. Besondere Beachtung muss hierbei den organischen Baustoffen (Holz, Kunststoff) geschenkt werden²¹⁰, da der Anteil an Zusatzstoffen in ihnen besonders hoch ist.

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	Eine Konzentration von Schad- und Störstoffen im Redukt ist nicht nachweisbar
2	Störstoffe sind nur in geringem Umfang vorhanden
3	Eine Konzentration von mobilisierbaren Schadstoffen im Redukt ist nicht nachweisbar
4	Es sind nicht-mobilisierbare Schadstoffe im Redukt enthalten
5	Das Redukt enthält mobilisierbare Schadstoffe, deren Umfang jedoch bekannt und beherrschbar ist
6	Das Redukt enthält Störstoffe, die nur sehr aufwändig beherrscht werden können
7	Das Redukt enthält Störstoffe, deren Verbleib nicht beherrscht wird
8	Das Redukt enthält mobilisierbare Stoffe, von denen eine Schädwirkung vermutet wird
9	Das Redukt enthält in nennenswertem Umfang mobilisierbare Schadstoffe mit toxischer Wirkung
10	Das Redukt enthält toxische, mobilisierbare Schadstoffe, die nicht sicher beherrscht werden können

Tabelle 4.8: Ausprägung des Schadstoffgehalts im Hinblick auf den Dispersionsgrad

4.1.2.3 ÖKONOMISCHE KRITERIEN

Ökonomische Kriterien entscheiden in einer Marktwirtschaft unter den Rahmenbedingungen des Ordnungsrechts, der herrschenden Technologie sowie der volkswirtschaftlichen Parameter darüber, ob eine Maßnahme durchgeführt wird oder nicht. Zentrales Ziel von Akteuren ist dabei der Erhalt der unternehmerischen Wettbewerbsfähigkeit, wobei ökonomisch-rationales Handeln unterstellt werden kann. Bezogen auf die Bewertung von Produkten im Hinblick auf ihren Dispersionsgrad soll hier die ökonomische Vorteilhaftigkeit von Verfahren zur Behandlung von Redukten und anschließenden Rückführung in den Nutzungsprozess betrachtet werden.

Souren hat für seine Beschreibung der Theorie der betrieblichen Reduktion als Komplement der Produktion die Bedeutung der ökonomischen Kriterien in der Erfolgsebene aufgegriffen und klar dargelegt, dass eine Reduktion nur dann greift, wenn die Erlöse durch den Verkauf

²¹⁰ BUWAL gibt eine ausführliche Darstellung der zur Zeit verwendeten Rezepturen von Baustoffen in der Schweiz. Hochgerechnet auf eine zukünftige Abgangsmenge werden so 5000 t Polymere, 350 t Celluloseether, 200 t Weichmacher sowie 250

der Produkte die Kosten für die Einsatzstoffe, die Entsorgung der unerwünschten Stoffe und die Kapitalkosten der verwendeten Technologie übersteigen²¹¹. Er zeigt aber auch, dass eine ausschließliche Betrachtung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit nicht losgelöst von der vorher anzustellenden Berücksichtigung des Ziels der Reduktion sein kann (bei Souren Ergebnissebene genannt).

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass heutzutage immer noch ein Versagen des Marktes bei der angemessenen Berücksichtigung der Komponente Natur festgestellt werden muss²¹². Die Leistungen der Natur auf der Emissionsseite werden nicht als wahre „Externe Kosten“ in die Preise hinein kalkuliert, ebenso ist der Markt nicht in der Lage, die ressourcenseitige Beanspruchung der Natur in Form von adäquaten monetären Knappheitssignalen abzubilden. Dies gilt analog auch für die Preise der Abfallentsorgung, die bislang durch eine zu niedrige Gebührenfestsetzung keine adäquaten Anreize zur Abfallvermeidung setzen konnte. Faber et al. errechneten 1988 in einer abfallwirtschaftlichen Studie für Baden-Württemberg, dass den damaligen Deponierungsgebühren von 80 DM / t eine Knappheitskomponente von etwa 260 DM / t, also etwa der Faktor 3, zugeschlagen werden müsse²¹³. Die gegenwärtige Entwicklung hat zumindest auf dem Gebiet der Deponiepreise zu einem stärkeren Anstieg geführt, es bleibt allerdings abzuwarten, ob und inwieweit sich hieraus die erhoffte Lenkungswirkung entfalten kann.

Wie zu Beginn des Abschnitts bereits erwähnt, unterliegen die ökonomischen Kriterien im Zeitablauf den größten Schwankungen, da ihre Bewertung immer abhängig ist von herrschenden Technologien, ordnungspolitischen Rahmenbedingungen und volkswirtschaftlichen Gegebenheiten wie etwa Kosten für Arbeit, Kapital und Boden. Die angestellten Überlegungen und Bewertungen stellen daher eher eine Momentaufnahme mit dem Ziel dar, Anreize und Maßnahmen zu identifizieren, eventuell ungünstige Bewertungen im Zeitablauf zu korrigieren.

Im folgenden sollen im wesentlichen zwei Kostenarten unterschieden werden, deren Bewertung jeweils nicht losgelöst von einer häufig ex ante durchzuführenden Zielfestlegung ange stellt werden kann:

- Separierungskosten
- Logistikkosten

Hinzu kommt eine explizite Aufnahme des Kriteriums „Existierender Sekundärrohstoffmarkt“, mit dem sowohl die Frage nach der Bestimmung eines geeigneten Produktes als auch die bereits durchgeführten und noch weiter zu intensivierenden Marketinganstrengungen zur Integration von Sekundärprodukten in die Primärproduktion berücksichtigt werden sollen.

^t Formaldehyd-Kondensat pro Jahr im mineralischen Abfall erwartet. (BUWAL, 1995, S. 116)

²¹¹ Souren (1996, S. 56, 78). Für Souren geht die Betrachtung noch weiter: Er geht davon aus, unter verschiedenen Reduktionsalternativen wählen zu können und letztendlich die erfolgsmaximale zu wählen. Dieser Ansatz wird hier nicht weiter verfolgt.

²¹² vgl. Binswanger, Minsch (1992, S. 42 ff.)

²¹³ vgl. Faber, Stephan, Michaelis (1988)

4.1.2.3.1 Separierungskosten

Es gibt eine ganze Reihe von Publikationen und Untersuchungen zur ökonomischen Beurteilung von Separierungskosten im Recyclingprozess²¹⁴. Nicht selten begleiten diese den Aufbau eines neuen Wirtschaftszweigs, der aufgrund übergeordneter Erkenntnisse wie etwa ökologischer Forderungen in Form neuer Grenzwerte oder sich verändernder Rahmenbedingungen wie etwa eine Erhöhung von Deponiepreisen entsteht²¹⁵ und für den anschließend techno-ökonomische Optimierungen für die Anlagenplanung angestellt werden.

Im Bereich der Aufarbeitung von Baureststoffen sollen Separierungskosten als diejenigen Kosten eines Betreibers einer Recyclinganlage verstanden werden, die anfallen, um eine Anlage zur Bearbeitung von Altmaterial und weiteren Aufarbeitung zu wieder einsetzbarem Sekundärstoff zu betreiben einschließlich der Kosten für die Entsorgung nicht marktfähiger Reststoffe. Dies stellt eine bewusste Abgrenzung zu Transportkosten sowie zu denjenigen Kosten dar, die etwa im Rahmen eines gezielten Rückbaus eines Gebäudes anfallen und unter Logistikkosten zusammengefasst werden sollen. Das Kriterium Separierungskosten ist also dann günstig zu bewerten, wenn es eine Technologie und ein Verfahren gibt, mit denen die Aufarbeitung von Redukten wirtschaftlich lohnend ist, also die Summe der aufwandsseitigen Größen niedriger ist als die Summe der erlösseitigen Größen wie Annahmgebühren und Preise für abgesetzte Materialien.

Die ersten ausführlichen Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit von Bauschuttrecyclinganlagen stammen von Offermann²¹⁶. Er identifizierte anhand verschiedener Anlagentypen (stationär, semimobil, mobil) verschiedene Kostenverläufe für die einzelnen Kostenbestandteile der Separierungskosten, die sich zusammensetzen aus

- Investitionsabhängigen Kostenarten (Abschreibung für Anlage und Grundstück, Finanzierungskosten)
- Betriebsabhängigen Kostenarten (betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten wie Energie, Reparatur, Verschleiß, Wartung sowie Entsorgungskosten für nicht verwertbare Reststoffe; bei mobilen Anlagen ggf. noch Montagekosten)
- Personalkosten

Aufbauend auf diese Arbeit von Offermann hat die Zahl der Untersuchungen zur techno-ökonomischen Optimierung von Bauschuttrecyclinganlagen in den 90er Jahren stark zugenommen. Schmidt nennt in seiner Untersuchung der einzelnen Kostenbestandteile einen Preis von 12,30 DM/t für unsortiertem Bauschutt²¹⁷, Spengler berichtet von durchschnittlichen Annahmepreisen an Bauschuttaufbereitungsanlagen zwischen 11,75 DM/t – 13,90 DM/t²¹⁸, Händl erwähnt Kosten von 40 – 45 DM/t für eine Anlage zur Aufbereitung von Baustellenabfällen und verunreinigtem Bauschutt²¹⁹, Bilitewski kalkuliert Fixkosten für unterschiedliche Anlagenkonfiguration und Anlagengrößen zwischen 2,50 DM/t und 17,50 DM/t²²⁰. In der Markt- und Technologiestudie Dortmund schließlich werden Kosten zwischen 5 DM/t

²¹⁴ Zur theoretischen Fundierung vgl. etwa Siegler (1991) oder Faber et al. (1995)

²¹⁵ Beispiele hierfür sind die Branchen Recycling von Elektronikschrott, Altabtobehandlung (vgl. hierzu etwa Püchert, 1996, S. 57 ff.), Aluminium oder Kunststoffe (grüner Punkt).

²¹⁶ vgl. Offermann (1988)

²¹⁷ Schmidt (1987, S. 232)

²¹⁸ Spengler (1994, S. 115)

²¹⁹ Händl (1994, S. 155)

²²⁰ Bilitewski (1994, S. 319)

und 12,60 DM/t genannt²²¹. Eine umfassende Behandlung dieses Thema findet sich auch in der Dissertation von Nicolai²²².

Die Vielzahl der Untersuchungen deutet darauf hin, dass es mittlerweile einen etablierten Markt für die Behandlung und Aufbereitung von Bauschutt gibt, auch wenn dieser nur einen kleinen Teil der tatsächlichen anfallenden Mengen erfasst (Glenck et al. sprechen von höchstens 10-15 % des jährlichen im Bauwesen anfallenden Bauschutts, der zu Recyclinganlagen gelangt)²²³. Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass die Separierungskosten nur ein Bestandteil in einem Entscheidungsgefüge sind, das von den möglichen Annahmgebühren und den damit konkurrierenden Deponiepreisen einerseits sowie den erzielbaren Erlösen und den mit dem aufbereiteten Material konkurrierenden Kosten für Primärmaterial andererseits gebildet wird²²⁴.

Für Materialien, die nicht als „klassischer“ mineralischer Baustoff mit einer möglichen Verwertungsoption klassifiziert werden können, stehen jedoch häufig keine wirtschaftlich geeigneten Technologien zur Verfügung²²⁵.

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	Es fallen keine Kosten für Separierung und Aufbereitung an
2	Die Kosten für Separierung und Aufbereitung sind klein
3	Mehrere Technologien konkurrieren um Separierung und Aufbereitung
4	Es existiert mindestens eine wettbewerbsfähige Technologie zur Separierung
5	Es existiert nur eine Technologie zur Separierung und Aufbereitung, die sich nicht dem Wettbewerb stellen muss (ordnungsrechtliche Steuerung)
6	Es gibt mindestens eine Technologie zur Separierung und Aufbereitung, die bei Variation weniger Randbedingungen wettbewerbsfähig wäre
7	Es gibt eine Technologie zur Separierung und Aufbereitung, die bei Variation mehrerer Randbedingungen eingesetzt werden könnte
8	Es gibt eine Technologie, die im großtechnischen Maßstab erprobt wird
9	Es werden erste Versuche zur Separierung durchgeführt, die jedoch weder wettbewerbsfähig noch im großtechnischen Maßstab verfügbar sind
10	Es existiert keine Separierungstechnologie oder mit prohibitiv hohen Kosten

Tabelle 4.9: Ausprägung der Separierungskosten im Hinblick auf den Dispersionsgrad

²²¹ Palinkas/Weber (1996, S. 170)

²²² Nicolai (1994)

²²³ Glenck et al. (1996, S. 155)

²²⁴ vgl. hierzu die Arbeit von Valdivia Mercado. Sie hat am Beispiel des Oberrheingrabens gezeigt, welches Substitutionspotenzial für Kies und Sand unter gegebenen Rahmenbedingungen besteht und welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die substituierten Mengen zu erhöhen. (1995, S. 204 ff.)

²²⁵ vgl. Palinkas/Weber (1996, S. 174). Am Beispiel einer Recyclinganlage für Bitumendachbahnen zeigen sie, dass deren Wirtschaftlichkeit erst dadurch erreicht werden kann, dass die Deponiepreise künstlich auf 1000 DM/t angehoben werden, obwohl das Verfahren mit einem Annahmepreis von 600 DM/t eigentlich zu teuer ist. (zur Technologie vgl. Palinkas/Weber, 1996, S. 150ff.)

4.1.2.3.2 Logistikkosten

Unter den Logistikkosten sollen alle Arten von anfallenden Lager- und Transportkosten berücksichtigt werden, ebenso Planungs- und Steuerungskosten im Rahmen eines gezielten Rückbaus von Gebäuden. Die separate Betrachtung von Logistikkosten ist allein wegen der großen Massen erforderlich, die im Rahmen der Bauschuttbehandlung anfallen. Nimmt man die seit 1994 geltenden „Kostenorientierten Unverbindlichen Richtpreis-Tabellen“ (KURT) des Bundesverbands des Güternahverkehrs zu Rate, werden für den Transport von Schüttgütern bei einer Entfernung von 20 km bereit 8,20 DM/t verlangt²²⁶. Verglichen mit den Annahmegebühren an Bauschuttrecyclinganlagen, die in einer Größenordnung um 15 DM/t liegen, sind hier bereits durch den Transport von der Abbruchstelle bis zum Aufbereiter erhebliche finanzielle Ressourcen gebunden. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt Schmidt, der die Materialfracht zur Baustelle mit 8-10 DM/t annimmt²²⁷.

Die im Rahmen des Rückbaus erforderliche logistische Planung einer optimalen Demontagetiefe ist ebenfalls von erheblicher Bedeutung. Hier existieren eine Reihe von Untersuchungen, die angesichts bestehender Rahmenbedingungen (Deponierungspreise, Transportkosten, Aufbereitungskosten, Verwertungserlöse, ordnungsrechtliche Rahmen) die optimale Demontagetiefe ermitteln²²⁸. Hierbei fallen zunächst Kosten zur Erfassung der Gebäudezusammensetzung an, ferner Kosten zur Planung von Verwertungsoptionen und die daran anknüpfende laufende Kapazitätsplanung für durchzuführende Maßnahmen für einzelne Bauteile und Baustoffe, die Kosten für die Miete und das Stellen von Sammelcontainern sowie allgemein Kosten für die Überwachung des Baustellenbetriebs.

Im wesentlichen ist von einer günstigen Bewertung hinsichtlich des Dispersionsgrads auszugehen, wenn folgende Bedingungen vorliegen:

- Es existiert eine adäquate Infrastruktur von Verwertungsbetrieben, so dass die Transportkosten die Separierungskosten nicht dominieren und die Wirtschaftlichkeit des Verwertungspfads nicht in Frage stellen
- Die Kosten für die logistische Leistung (Planung und Abwicklung der Baustelle) zur Gewährleistung eines effizienten Rückbaus gefährden nicht die Wirtschaftlichkeit der Verwertung, d.h. dass der Planungs- und Überwachungsaufwand für ein Bauteil oder einen Baustoff gering ist

Schultmann zeigt anhand der Planung von Verwertungskonzepten beim Rückbau von Gebäuden, dass abgesehen von hochwertigen Redukten die Einbettung in den regionalen Kontext von großer Bedeutung ist. Dabei zeigt sich bei der Betrachtung der geographischen Verteilung von Verwertungsbetrieben und Sammelstellen für Bauabfälle in Baden und im Elsass, dass eine Konzentration der Betriebe auf die Ballungsräume Basel, Freiburg, Strasbourg, Karlsruhe, Mannheim-Heidelberg und Konstanz erfolgt, wo die Kapazitätsauslastung der Anlagen auch am ehesten gewährleistet werden kann (höchste Dichte von „Redukt-Input“, ebenso höchste Dichte von potenziellen Nachfragern)²²⁹.

²²⁶ Bundesverband des Deutschen Güternahverkehrs: Kostenorientierte unverbindliche Richtpreis-Tabellen, München, 1994

²²⁷ Schmidt (1987, S. 232)

²²⁸ vgl. etwa Rentz et al. (1994), Nicolai (1994), Rentz et al. (1997) sowie insbesondere Schultmann (1998)

²²⁹ vgl. Schultmann (1998, S. 90)

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	Planungs- und Transportkosten fallen nicht an
2	Redukt ist ohne großen Planungsaufwand getrennt sammelbar und in der Nähe zu bearbeiten
3	Es gibt eine effiziente Verwertungsinfrastruktur
4	Verwertungsinfrastruktur im großen und ganzen effizient
5	Redukt erfordert speziellen Planungs- und Überwachungsaufwand beim Rückbau
6	Verwertungsinfrastruktur häufig nicht kostendeckend
7	Vorhandene Verwertungsinfrastruktur nicht wirtschaftlich, hoher Planungsaufwand
8	Planung und Transport zur Verwertung erfolgen nur punktuell und zufällig
9	Anlieferung von Redukten an Versuchsanlagen über weite Strecken, Infrastrukturplanung noch erforderlich
10	Keine Verwertung wegen prohibitiv hoher Logistikkosten

Tabelle 4.10: Ausprägung der Logistikkosten im Hinblick auf den Dispersionsgrad

4.1.2.3.3 Existierender Sekundärrohstoffmarkt

Obwohl die Wirtschaftlichkeit der Sortierung und Aufbereitung von Baurestmassen aus dem Hochbaubereich in vielen Fällen bereits gegeben ist, bestehen noch immer eine Reihe von Marktbarrieren, die eine erfolgreiche Vermarktung von Recyclingprodukten im Hochbaubereich verhindern. Lediglich im Bereich des Tiefbaus ist die Marktakzeptanz bereits weitgehend vorhanden, auf dieses Einsatzgebiet entfallen über 90 % des gesamten Absatzmarktes für Recyclingprodukte, auch aus dem Hochbau²³⁰. Es kommt hier also zu einem Downcycling von hochwertigem Hochbaumaterial in Einsatzfelder wie Straßenbau, Erdbauarbeiten und Lärmschutzwände.

Es zeigt sich jedoch, dass im Hochbau bislang nur rudimentäre Ansätze vorhanden sind, einen Sekundärrohstoffmarkt zu etablieren, obwohl dies in vielen Fällen von der technologischen Sicht her möglich ist. Allein im Bereich der Betonzuschläge, der mit 200 Mio. t/a etwa 2/3 der gesamten Kies- und Sandförderung ausmacht, eröffnet sich für geringe und mittlere Anforderungen ein sehr großer Markt für Produkte aus Baurestmassen, zumal diese nur eine Größenordnung von etwa 30 Mio. t/a ausmachen. Hierzu ist es jedoch zunächst erforderlich, über die Definition von Qualitätsstandards und möglichen Einsatzgebieten das Produkt bzw. die Produktpalette zu bestimmen, mit denen am Markt operiert werden soll. Diese Eigenschaften des Sekundärprodukts müssen zu einem Standard formuliert, auf bestimmte Nut-

²³⁰ vgl. Palinkas/Weber (1996, S. 171 ff.) Gefördert wird die Akzeptanz im Tiefbau auch durch Lieferbedingungen, die an die Beschaffenheit des Sekundärmaterials gestellt werden (TL Recyclingbaustoffe im Straßenbau).

zungen abgestimmt und jederzeit nachprüfbar und juristisch belastbar formuliert werden. Daneben ist die Planung weiterer Marketingmaßnahmen, insbesondere im Hinblick auf die Kommunikationspolitik (Förderung der Akzeptanz beim Verbraucher), auf den Aufbau eines effektiven Vertriebssystems (z.B. Aufbau einer Bauschutt-Recyclingbörse) sowie eine angemessene Preisgestaltung erforderlich²³¹.

Neben der Planung und Durchführung eigener Marketingstrategien können weitere Maßnahmen wie die Einführung ordnungsrechtlicher Standards (Ausgleichsabgaben zur Rohstoffsicherung auf Primärrohstoffe, Grenzwerte oder Verbote bei der Deponierung) und die Änderung der allgemeinen Angebots- und Nachfragesituation im Hochbau die Etablierung eines Sekundärrohstoffmarktes fördern²³².

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	Der Sekundärrohstoff ist akzeptiert und günstiger als der Primärrohstoff
2	Sekundärrohstoff und Primärrohstoff werden als gleichwertig angesehen
3	Der Sekundärrohstoff hat in einer Vielzahl von Anwendungen den gleichen Stellenwert wie der Primärrohstoff, jedoch nicht in allen
4	Der Sekundärrohstoff ist in vielen Anwendungen akzeptiert, jedoch lassen sich nur niedrigere Preise als mit Primärrohstoff erzielen
5	Zur Erhöhung der Quote des Sekundärrohstoffs und zur Etablierung eines Marktes erfolgt eine aktive Subventionierung
6	Der Sekundärrohstoff wird zwar zu weiten Teilen wiederverwertet, jedoch in qualitativ niedrigeren Anwendungen (Down-Cycling)
7	Es fehlen überwiegend Qualitätsstandards für Sekundärprodukte
8	In Pilotversuchen werden Sekundärrohstoffe als Ersatz für Primärrohstoffe eingesetzt
9	Die marktlichen Gegebenheiten (Preise für Primärrohstoff, Deponiepreise) lassen auch mittelfristig keine nennenswerte Wettbewerbsfähigkeit des Sekundärrohstoffs erwarten
10	Es existiert kein Sekundärrohstoffmarkt, auch nicht in absehbarer Zukunft. Der Stoff muss aus dem Kreislauf ausgeschleust werden

Tabelle 4.11: Ausprägung des existierenden Sekundärrohstoffmarkts im Hinblick auf den Dispersionsgrad

²³¹ zu Überlegungen hinsichtlich Marketingaspekte und Marketingmaßnahmen vgl. Palinkas/Weber (1996, S. 183 und S. 193 ff.) sowie Gewiese (1998, S. 192 f.)

²³² vgl. Valdivia Mercado (1995, S. 216)

4.1.2.4 INDIVIDUELL-WAHRNEHMUNGSBEZOGENE KRITERIEN

Bereits in den Ausführungen über die erforderlichen Marketingmaßnahmen zum Aufbau eines funktionsfähigen Sekundärrohstoffmarktes ist die Bedeutung der individuell-wahrnehmenden Komponente der Akteure angedeutet worden. Nur wenn die Akteure, die an den verschiedenen Stellen des Stoffstrommanagements tätig werden sollen, laufende Informationen und Kenntnisse über die Ziele anderer Akteure sowie die Reaktionen und Wirkungsweisen ihrer Maßnahmen besitzen, können Maßnahmen zu einer Gestaltung des Stoffstroms wirksam umgesetzt werden. Häufig ist zu beobachten, dass Konzepte und Maßnahmen, die nachweislich sowohl ökonomisch als auch ökologisch günstiger sind, von den Individuen nicht akzeptiert werden, weil es das Marketing nicht geschafft hat, bestehende Ängste und Bedenken auszuräumen und die Vorteile des Neuen auch auf einer psychologischen Ebene zu vermitteln²³³.

Bevor die Eignung von Produkten hinsichtlich einer positiven individuellen Wahrnehmung bewertet werden kann, muss daher zunächst ein Verständnis über die beteiligten Akteure im Stoffstrom hergestellt werden, woraus sich wiederum ein Bild darüber ergibt, für welche Zielgruppe die Bereitschaft verbessert werden kann. Flatz unterteilt die am Stoffstrommanagement beteiligten Akteure in insgesamt vier Gruppen²³⁴:

- Staatliche Akteure. Sie setzen die Rahmenbedingungen für die Handlungen entlang des Stoffstroms. Häufig entspringt ein bewusstes Handeln in einem Stoffstrom der Erkenntnis über die Wirkung anthropogener Stoffströme und einer daraus resultierenden normativen Festlegung von Rahmenbedingungen (z.B. Grenzwerte, Verbote), die dann durch die wirtschaftlichen Akteure ausgeführt werden.
- Primäre wirtschaftliche Akteure. Diese treffen unmittelbar Produktions-, Konsum- oder Entsorgungsentscheidungen und beeinflussen somit den Stoffstrom unmittelbar. Innerhalb des von staatlichen Akteuren festgelegten Rahmenbedingungen agieren sie als ökonomische Wesen und sorgen somit für eine Rückmeldung über die Erfahrungen an die staatlichen Akteure.
- Sekundäre wirtschaftliche Akteure. Zu ihnen zählen Handel, Banken und Versicherungen. Durch ihre Verhaltensweise beeinflussen sie das Verhalten der primären Akteure (Sortimentspolitik, Kreditgewährung, Versicherungsschutz).
- Sonstige nichtstaatliche Akteure. Sie beeinflussen das Handeln von Akteursgruppen. Hierzu zählen im wesentlichen Industrieverbände, Umweltverbände und Normungsinstanzen. Sie versuchen, die normsetzenden staatlichen Akteure direkt zu beeinflussen.

In der Praxis zeigt sich immer wieder, dass zunächst staatliche Akteure die ersten Impulse zu einem stoffstromorientierten Verhalten setzen, da einzelne Wirtschaftssubjekte dies aus mehreren Gründen heraus nicht in Angriff nehmen:

²³³ Ein Beispiel für dieses Dilemma scheint die thermische Verwertung von Kunststoffen zu sein, die von wenigen Ausnahmen abgesehen, dem aufwändigen logistischen Sammelsystem „Grüner Punkt“ sowohl ökonomisch als auch ökologisch überlegen ist. Ein positives Beispiel ist hingegen der Erfolg der Kraftwerksbetreiber Ende der 80er Jahre, ihren REA-Gips zu vermarkten und diffuse Ängste bzgl. der chemischen Zusammensetzung auszuräumen.

²³⁴ vgl. Flatz (1995, S. 132). Griefhammer/Buchert (1996, S. 28) fügen noch die Akteursgruppe der Verbraucher auf. Diese besäßen zwar keine abgestimmte, gemeinsame Handlungsstrategie, sind aber ihrer Meinung nach aufgefordert, sich durch einen Wertewandel an der Gestaltung des Stoffstroms zu beteiligen. Dieser Einschätzung wird an dieser Stelle nicht gefolgt.

- 80 % unserer Handlungen beruhen auf Automatismen. Wir wissen zwar, was zu tun wäre, setzen dies aber selten in konkretes Handeln um. „Bewährte“ Automatismen und Routinehandlungen müssen oft erst bewusst gemacht und durchbrochen werden²³⁵.
- Der eigene Beitrag zur Umweltentlastung wird als kaum wahrnehmbar empfunden. Wir tun das, was wenig Aufwand erfordert und trösten uns mit Verharmlosungen über einschneidende Maßnahmen hinweg. Im Gegensatz dazu sind wir jedoch bereit, für die Umsetzung eines vorgegebenen Konzepts einen eigenen Beitrag zu leisten²³⁶.
- Für viele der ökologischen Themenstellungen wird die eigene Betroffenheit nicht in großem Umfang wahrgenommen, da die Auswirkungen sowohl räumlich als auch zeitlich als weit entfernt erscheinen. Es gelingt in der Regel nur dann, eine größere Betroffenheit herzustellen, wenn spektakuläre Ereignisse eintreten²³⁷.

Ausgehend von diesen Überlegungen kann ein Stoff bzw. ein Produkt mit einer günstigen Bewertung hinsichtlich der individuellen Wahrnehmung versehen werden, wenn die Bereitschaft der Akteure, den Stoffstrom sinnvoll zu gestalten, bereits entwickelt ist und Informationen über Ziele und Absichten der staatlichen Akteure an die wirtschaftlichen Akteure vermittelt wurden. Umgekehrt sollten Erfahrungen mit den Rahmenbedingungen und Auswirkungen auf den Stoffstrom an die staatlichen Akteure zurück fließen. Es gilt jedoch analog zu den ökonomischen Kriterien, dass die Bewertung von Produkten und Stoffen hinsichtlich ihrer individuellen Wahrnehmung nicht statisch ist, sondern durch verschiedene Maßnahmen im Zeitablauf verändert werden kann.

4.1.2.4.1 Akzeptanz

Durch das Kriterium der Akzeptanz wird ausgedrückt, inwieweit die Akteure im Stoffstrommanagement bereit sind, die Notwendigkeit zu einem stoffstromkonformen Verhalten zu erkennen und umzusetzen. Hierbei kann Akzeptanz in unterschiedlichen Phasen unterschiedliche Ausprägungen haben. Zu Beginn der Etablierung eines Handlungsrahmens und der daraus resultierenden Aktivitäten durch die wirtschaftlichen Akteure kennzeichnet Akzeptanz die Bereitschaft, Informationen offen aufzunehmen, sie zu verarbeiten und weiterzugeben. Für diese Phase kommt es aus Sicht der initiiierenden staatlichen Akteure maßgeblich darauf an, alle Akteure über Ziele und Absichten des Handlungsrahmens zu informieren und diesen Handlungsrahmen so auszugestalten, dass er für die Akteure motivierend wirkt. Ist ein Handlungsrahmen bereits etabliert, so kann dann von einer günstigen Akzeptanz des Produkts oder des Stoffs gesprochen werden, wenn die Akteure motiviert sind, wirtschaftliche Aktivität innerhalb dieses Rahmens zu entwickeln (z.B. durch Aufbau einer produkt- oder stoffspezifischen Reduktionswirtschaft).

Innerhalb des Bausektors gehören dabei eine Reihe von Beteiligten zu den wirtschaftlichen Akteuren, deren Akzeptanz für die Umsetzung stoffstrompolitischer Handlungsoptionen gesucht werden sollte. Hierzu gehören Bauherren, Architekten, Baustoffproduzenten, Baustoffverarbeiter (Handwerker), Rohstoffhersteller, Entsorger, Baustoffaufbereiter und Deponie-

²³⁵ vgl. Gutscher (1993, S. 4). Ein Beispiel für diese Verhaltensweise aus einer anderen Disziplin ist die aktuelle Rentendebatte

²³⁶ In diesem Zusammenhang soll auf die zahlreichen Untersuchungen hingewiesen werden, die eine erstaunlich große Zahlungsbereitschaft von Individuen etwa in der Verkehrspolitik dokumentieren.

²³⁷ Beispiele für spektakuläre Ereignisse sind Atomunfälle, Ölkrisen oder die erste Feststellung absterbender Bäume. Andere Ereignisse wie etwa die Auffüllung von Deponieräumen, die kontinuierlich vonstatten gehen, werden nicht registriert.

betreiber. Ferner spielen Banken eine erhebliche Rolle bei der Entscheidungsfindung für den Bauherrn bzw. Eigentümer.

Ausprägungsgrad	Ausprägung
1	Stoffstrommanagement ist vollständig realisiert und wird von allen Akteuren motiviert weiterentwickelt
2	Die Akteure zeigen eine große Bereitschaft, Maßnahmen zur Stoffstromgestaltung umzusetzen
3	Viele Akteure arbeiten an der Entwicklung von Maßnahmen zur Stoffstromgestaltung
4	Staatliche Akteure haben einen Handlungsrahmen für den Stoffstrom definiert, der allerdings noch nicht bei allen Akteuren akzeptiert ist
5	Akteure planen Maßnahmen zur Beeinflussung des Stoffstroms, die über das Ordnungsrecht hinausgehen
6	Maßnahmen zur Beeinflussung des Stoffstroms werden nur aufgrund des Handlungsrahmens praktiziert, jedoch nicht aufgrund wirtschaftlichen und motivierten Handelns der Akteure (meist ordnungsrechtliche Maßnahmen)
7	Staatliche Akteure planen einen Handlungsrahmen, der von den wirtschaftlichen Akteuren abgelehnt wird
8	Ansätze zur Stoffstromgestaltung sind erst in der Forschung angedacht
9	Die Akteure zeigen keine Bereitschaft, sich mit der Gestaltung des Stoffstroms auseinander zu setzen
10	Die Akteure lehnen eine Auseinandersetzung mit der Gestaltung des Stoffstroms ab

Tabelle 4.12: Ausprägung der Akzeptanz im Hinblick auf den Dispersionsgrad

4.1.2.4.2 Förderung des Umweltbewusstseins

Diejenigen Produkte und Stoffe werden günstig bewertet, deren technologische oder ökologische Eigenschaften im Vergleich zu alternativen Produkten vorteilhaft sind und dies auch von den Akteuren so wahrgenommen wird. Eine günstige Einschätzung erfolgt unabhängig davon, ob Maßnahmen zur Umsetzung eines Managements von Stoffströmen bereits ergriffen wurden oder nicht. Ferner soll mit diesem Kriterium evaluiert werden, inwieweit der Handlungsrahmen zum Umgang mit dem Produkt bzw. Stoff geeignet ist, das Umweltbewusstsein und das umweltbewusste Handeln bei den Akteuren zu fördern und die individuelle Akzeptanzschwelle, die sich durch die oben angeführten Automatismen und Verdrängungsmechanismen manifestiert, zu senken. Auf eine explizite Differenzierung der Ausprägungsgrad wird an dieser Stelle verzichtet.

4.2 Die Verweilzeit

Die Zusammensetzung des Baustofflagers in der Technosphäre ist sowohl quantitativ als auch qualitativ nur unzureichend bekannt. Um geeignete Verwertungs- und Entsorgungsstrategien zum richtigen Zeitpunkt entwickeln zu können, sind Kenntnisse und Annahmen über die Verweilzeit der Stoffe im Black-Box-System Bauwesen unabdingbar. Dabei sind jedoch eine Reihe von Schwierigkeiten zu überwinden, die in dieser Form für das Bauwesen kennzeichnend sind:

- Eine retrospektive Analyse der Input- und Outputströme ist nur bedingt tauglich, da aufgrund der langen Verweilzeiten der Stoffe im Bauwesen viele Annahmen bezüglich lang zurück liegender Ereignisse getroffen werden müssen (z.B. Statistiken vor 1949). Anders als bei Konsumgütern kann im Bauwesen häufig keine unmittelbare Verbindung zwischen Stoffeinsatz und Auftreten des Stoffes am Stoffausgang hergestellt werden²³⁸.
- Während zumindest die neueren Inputströme ins Bauwesen ihrer Menge und Zusammensetzung nach relativ gut bekannt sind, fehlen bis heute Möglichkeiten der Messung der Zusammensetzung der Abfallströme aus dem Bauwesen, bzw. die vorhandenen Daten weisen starke Streuungen auf. Es müssen also Annahmen über Lebensdauern von Baustoffen getroffen werden, deren Validität nur unzureichend überprüft werden kann.
- Aufgrund der sich ändernden Zusammensetzung der Baustoffe sowie der fehlenden Datenbasis kann die Trendextrapolation als Verfahren zur Prognose von Bauabfällen nicht angewendet werden. Auch andere statistische Verfahren, etwa über Einwohner- und Flächenkennwertmethoden (Schätzung des Pro-Kopf-Aufkommens) sind nicht valide²³⁹.
- Die Bauprodukte müssen bezüglich der Annahmen über ihre Lebensdauern und den daraus resultierenden Verweilzeiten je nach Einsatz im Gebäude unterschiedlich betrachtet werden. Während tragende Bauteile in der Regel während der Lebensdauer des gesamten Gebäudes nicht ausgetauscht werden, erscheinen nichttragende Bauteile in der Regel als Abfall im Zuge von Maßnahmen der Bauerhaltung (Renovierung, Modernisierung, Sanierung). Der Stoffstrom der nichttragenden Bauteile während der Lebensdauer des gesamten Gebäudes kann dabei über 50 % des gesamten Stoffstroms ausmachen²⁴⁰.
- Die Statistiken über Bauschuttmengen spiegeln nicht die reale Situation wider, da von einem wesentlich höheren Bauschuttaufkommen auszugehen ist²⁴¹.

²³⁸ vgl. Lahner (1994, S. 6)

²³⁹ vgl. Gallenkemper/Gellenbeck (1994, S. 11-2), die die schwache Korrelation zwischen Einwohnerdichte und Aufkommen an Bauschutt festgestellt haben.

²⁴⁰ vgl. Andrä et al. (1994, S. 110). Die Datenerhebung bezieht sich auf ein Wohngebäude mit 12 Wohneinheiten (Herrmann 1977). Schmitz/Stannek (1991) schätzen den Anteil der nichttragenden Bauprodukte auf 40 %.

²⁴¹ vgl. Glenck et al. (1996, S. 154)

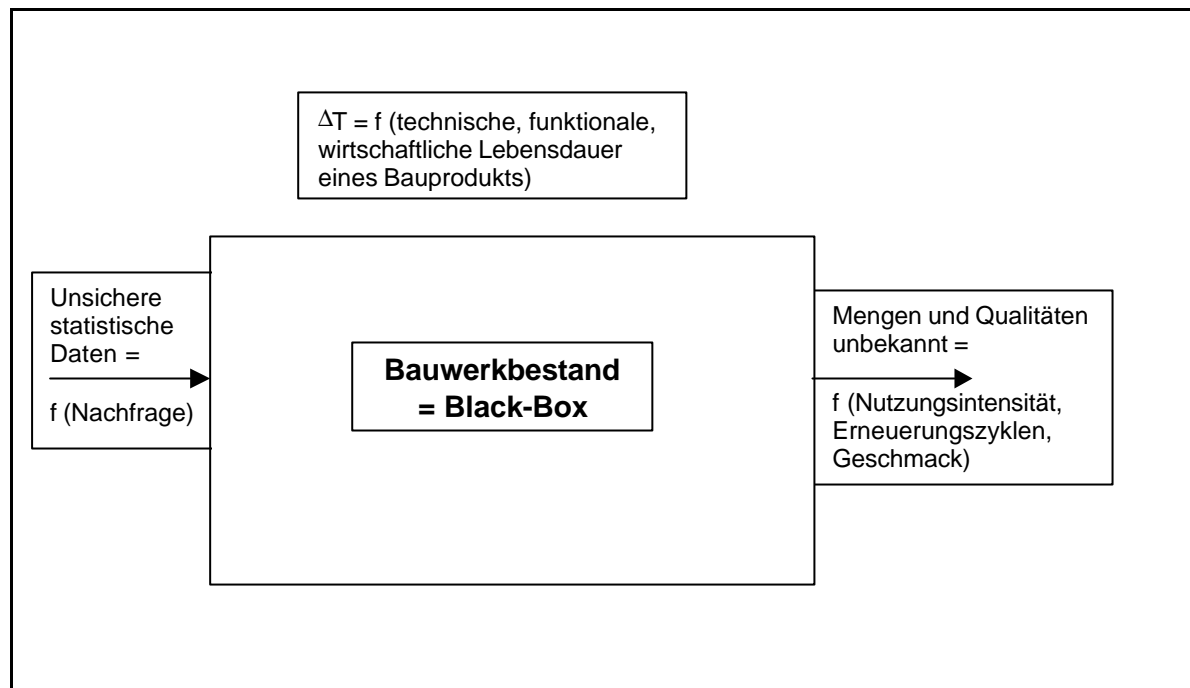


Abbildung 4.1: Einflussfaktoren auf Zu- und Abfluss im Stofflager Bauwesen

Um Stoffflussmodelle zu dynamisieren und Aussagen über Zusammensetzung und Umfang zukünftiger Bestände und Zufluss- sowie Abfallströme treffen zu können, müssen Annahmen über die Nachfrage nach Produkten zur Prognose der Zuflüsse sowie über den zu erwartenden Zeitpunkt des Auftretens von Stoffen aus dem Lagerbereich getroffen werden. Zur Vereinfachung der Darstellung wird zunächst die Entwicklung der Nachfrage (d.h. der Zugang ins Lager) nicht weiter betrachtet und als konstant angenommen²⁴². Statt dessen sollen Lebensdauerfunktionen unter Berücksichtigung der Lebenszyklen hergeleitet und mit den quantitativen und qualitativen Aussagen zum Lager Bauwesen verknüpft werden.

Zur Bestimmung der Verweilzeit von Produkten im Bauwesen wird folgende Vorgehensweise gewählt: Zunächst werden grundlegende Sachverhalte von Lebensdaueranalysen diskutiert, die die Basis für die Bestimmung der Verweilzeit darstellen. Anschließend werden die allgemeinen Überlegungen zur Lebensdauer mit den spezifischen Besonderheiten des Baubereichs verknüpft. Produktklassen mit ähnlichen Verweilzeiten werden anschließend mit einem kohortenanalytischen Ansatz weiter betrachtet.

4.2.1 Die Lebensdauer als Determinante für die Verweilzeit

4.2.1.1 GRUNDSÄTZLICHE NOTATIONEN VON LEBENSDAUERN

Für die allermeisten Güter, seien es Investitions- oder Konsumgüter, ist die Dauer ihrer Nutzbarkeit begrenzt. Hierunter fallen einige, deren Lebensende deterministisch vorhergesagt werden kann, etwa in Folge eines bestimmten Ereignisses, oder weil das Gut von vorne herein so konstruiert wurde. Für die meisten Investitionsgüter und technischen Güter hingegen ist die Lebensdauer, ebenso wie für den Menschen selbst, ein stochastisches, also zufälliges Ereignis, dessen genauer Eintritt sich nicht exakt vorhersagen lässt, aber aufgrund

²⁴² vgl. Kapitel 4.2.2.1

von Beobachtungen aus der Vergangenheit sowie Modellannahmen geschätzt werden kann. Es ist Aufgabe der Notation von Lebensdaueranalysen, für nicht beobachtbare oder empirisch ableitbare Ereignisse ein theoretisches Formelwerk bereitzustellen, mit dem die beobachtete Lebensdauerverteilung mit Hilfe der Momentenmethode als theoretische Verteilung approximiert werden kann²⁴³. Die Anwendung der Momentenmethode empfiehlt sich sowohl für die Analyse der Teilebensdauern als auch für die Prognose von Primärproduktlebensdauern²⁴⁴. Das Regelwerk stützt sich dann im wesentlichen auf die drei Kenngrößen Ausfallverteilung, Ausfalldichte und Ausfallrate.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ ordnet jedem Messpunkt t die Wahrscheinlichkeit dafür zu, dass ein zum Startpunkt 0 neues Teil zum Messpunkt t ausgefallen ist. Dabei steht t in der Regel für eine Zeiteinheit, kann aber auch eine andere Dimension beschreiben wie etwa Laufleistung eines Reifens oder Anzahl von Schaltvorgängen²⁴⁵.

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) dt$$

Diese stetige und differenzierbare Funktion wächst monoton, da gilt: $F(0) = 0$, $F(\infty) = 1$. Sie ist an jeder Stelle differenzierbar und liefert dann die relative Ausfallhäufigkeit zu einem Messpunkt (Notation $f(t) = F'(t)$).

Das Gegenstück zur Ausfallwahrscheinlichkeit ist die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$, sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teil zum Messpunkt t noch nicht ausgefallen ist. Es gilt: $R(t) = 1 - F(t)$; $R'(t) = -f(t)$.

Aus Ausfall- und Überlebenswahrscheinlichkeit kann die Ausfallrate $q(t)$ abgeleitet werden, die die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass ein bis zum Messpunkt t nicht ausgefallenes Teil im folgenden (marginalen) Zeitintervall $[t, t+\Delta t]$ ausfällt. Anders ausgedrückt: Mit welcher Wahrscheinlichkeit fällt ein Teil in der Zeitspanne $[t, t+\Delta t]$ aus, wenn es in der Zeitspanne $[0, t]$ nicht ausgefallen ist? Die Ausfallrate wird auch als Maß für die Anfälligkeit von Teilen bezeichnet, wenn diese ein bestimmtes Alter erreicht haben.

$$q(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{dF}{dt} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = -[\ln R(t)]'$$

Durch Integration und Einsatz der e-Funktion erhält man so eine Schreibweise, die plastisch darstellt, wie selbst bei konstant positiver Ausfallrate $q(t)$ die Überlebenswahrscheinlichkeit des Teils mit der Zeit exponentiell zurückgeht.

$$P(T > t + x | T > t) = \frac{R(t + x)}{R(t)} = e^{-\int_t^{t+x} q(t) dt}$$

Wenn die Ausfallrate jetzt mit der Zeit noch zunimmt (erhöhte Alterssterblichkeit durch allgemeines Nutzungsende), erhält man eine abfallende Überlebenswahrscheinlichkeit. Der Effekt einer zunächst konstanten, in der Regel relativ niedrigen Ausfallrate, die ab einem bestimmten Zeitpunkt zu steigen beginnt, ist nach einer gewissen Nutzungsdauer bei den meisten Gütern zu beobachten. Bei technischen Entwicklungen ist auch die Existenz der

²⁴³ Die Herleitung und Anwendung der Momentenmethode ist in den meisten Lehrbüchern der Statistik beschrieben, vgl. hierzu z.B. Hartung (1991)

²⁴⁴ Meidlinger (1993, S. 130)

²⁴⁵ In der Notation beschreibt dabei die stochastische Variable T das zufällige Ereignis des Ausfalls.

sogenannten Badewannenkurve empirisch nachgewiesen, wonach am Anfang der Lebensdauer eine erhöhte Ausfallrate bedingt durch Konstruktionsfehler (Kinderkrankheiten) festzustellen ist.

Es gibt eine Reihe von statistischen Lebensdauerverteilungen, die mit Hilfe einer mathematischen Wahrscheinlichkeitsfunktion den Ausfallprozess als Funktion der Nutzungsdauer beschreiben. In der Praxis ist es jedoch häufig nicht einfach, eine aus Vergangenheitsdaten ermittelte empirische Verteilung durch eine mathematische Beschreibung zu approximieren. Dabei müssen Hypothesen über die Gültigkeit einer bestimmten Verteilung getroffen und mit Hilfe von statistischen Güteverfahren validiert werden²⁴⁶. Auf die Darstellung von diskreten Verteilungen soll an dieser Stelle verzichtet werden²⁴⁷, statt dessen sollen kurz die Eigenschaften einiger stetiger Verteilungen diskutiert werden.

Die **Exponentialverteilung** unterstellt, dass das Absterbeverhalten vom Alter eines Teils völlig unabhängig ist, die Ausfallrate also über die gesamte Zeit konstant bleibt. Damit eignet sie sich zur Beschreibung von Stoffen, die keinen Alterungsprozessen unterliegen, was jedoch bei der Betrachtung von Gütern in der Praxis eher selten der Fall sein dürfte. Statt dessen findet die Exponentialverteilung Eingang bei der Analyse und Planung von unerwarteten Ausfällen, etwa in der Elektronik²⁴⁸. Für die Exponentialverteilung muss lediglich die Ausfallrate λ oder die mittlere Lebenserwartung $T (= 1 / \lambda)$ geschätzt werden.

Die **Gammaverteilung** erweitert die Grundlage der Exponentialverteilung, indem sie auch monoton steigende oder fallende Ausfallraten abbilden kann. Dies wird durch eine spezielle Darstellung der Verteilungsfunktion erreicht, die sich über das Produkt der Verteilung von r zufälligen und unabhängig identisch exponentialverteilten Größen X_1, \dots, X_r ergibt. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Gammaverteilung ist definiert als

$$f(t) = \frac{1}{\Gamma(r)} a(a t)^{r-1} e^{-a t}$$

Daraus folgt als Gammafunktion:

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{r-1} dx = (r-1)!, \text{ wobei } r \text{ ganzzahlige, positive Werte annehmen kann.}$$

Bei $r=1$ ist diese Funktion mit der Exponentialverteilung mit konstanter Ausfallrate identisch. Bei $r>1$ ergibt sich eine monoton steigende Ausfallrate $q(t)$ und eine entsprechend monoton fallende mittlere Lebenserwartung, wobei für steigende r die Ausfallrate am Anfang klein ist und mit der Zeit dann um so stärker ansteigt.

Die **Weibull-Verteilung** ist für die Beschreibung von Materialermüdungserscheinungen von Teilen konzipiert. Sie folgt dabei der allgemeinen Form $R(t) = e^{-s(t)}$, wobei die Funktion $s(t)$ positiv, nichtfallend und konvergent sein soll der Form $s(t) = \lambda \cdot t^\alpha$. Analog zur Gammaverteilung ergibt sich für den Wert $\alpha = 1$ die Exponentialverteilung mit konstanter Ausfallrate, je-

²⁴⁶ Es gibt eine Reihe statistischer Güteverfahren zur Überprüfung der Eignung einer Verteilung, etwa Chi-Quadrat, t-Test oder die Maximum-Likelihood-Methode. Welches der Güteverfahren zur Anwendung gelangt, hängt häufig von den Randbedingungen der Aufgabenstellung und von der hieraus zur erwartenden Beschaffenheit der Daten ab. Für alle Sterblichkeitsfunktionen können nicht-parametrische Tests verwendet werden (es werden keine Hypothesen über die zugrunde liegende Verteilung angestellt). Eine Übersicht über die Güteverfahren ist z.B. in Hartung (1991) zu finden.

²⁴⁷ Eine gute Übersicht hierzu bietet Meidlinger (1993, S. 130 ff.)

²⁴⁸ vgl. Meidlinger (1993, S. 134) sowie die dort zitierten Studien

doch liegt keine Konvergenz für Werte $\alpha > 1$ vor. Im Bereich $1 < \alpha < 2$ ist die Ausfallrate monoton steigend mit abnehmenden Zuwachsraten, bei $\alpha = 2$ steigt die Ausfallrate linear an, und bei $\alpha > 2$ nehmen die Zuwachsraten der Ausfallrate mit der Zeit immer stärker zu.

Die Weibull-Verteilung erlaubt für Zuverlässigkeitsanalysen die detaillierteste Abbildung der tatsächlichen Verhältnisse im Fall komplexer Güter. Mit ihr kann bei entsprechender Wahl des Parameters α (z.B. $\alpha = 10$) der häufig anzutreffende Sachverhalt dargestellt werden, dass es um den geschätzten Mittelwert herum zu einem fast sprunghaften Anstieg der Ausfallwahrscheinlichkeit kommt, während diese zu Anfang noch klein ist. Wird α eher klein gewählt (z.B. $\alpha = 2$), so ergibt sich bereits in frühen Phasen der Lebensdauer eine verhältnismäßig hohe Ausfallwahrscheinlichkeit (z.B. beträgt bei $\alpha = 2$ und einer geschätzten mittleren Lebensdauer von 30 Jahren die Ausfallwahrscheinlichkeit bei 15 Jahren bereits über 22 %). Auf der anderen Seite sind im oben gewählten Beispiel nach 40 Jahren immer noch 17 % der Teile aktiv, während bei einer Wahl von $\alpha = 10$ nach 40 Jahren praktisch kein Teil mehr vorhanden ist. Für den Fall $\alpha = 4$ zeigt sich eine erstaunliche Parallelität des Verlaufs mit der Kurve der Normalverteilung, wobei die Weibull-Verteilung der Normalverteilung jeweils vorausläuft (Berücksichtigung von mehr Ausfällen zu Beginn). Wird der rechnerische Mittelwert der Weibull-Verteilung über den erwarteten Mittelwert angehoben (z.B. auf 35 Jahre), läuft die Weibull-Verteilung der Normalverteilung hinterher²⁴⁹.

Gegenüber der Exponentialverteilung, bei der lediglich der Parameter der mittleren Lebensdauer geschätzt werden muss, erfordert die Weibull-Verteilung eine zusätzliche Hypothese über den Wert von α . Zur Schätzung der Parameter bieten sich prinzipiell folgende Verfahren an²⁵⁰:

- Direkte Messung an einzelnen Teilen und Auswertung der Ergebnisse. Für dieses Verfahren muss jedoch zunächst eine hinreichende Anzahl an Messungen bestimmt werden, darüber hinaus ist es sehr aufwändig und häufig nicht durchzuführen
- Empirische Untersuchung von Vergangenheitsdaten. Diese Methode ist oft die einzig mögliche, jedoch müssen Vergangenheitseinflüsse und die Variation exogener Parameter mit berücksichtigt werden. Es muss sehr genau untersucht werden, ob die Aussagen, die sich aus der Analyse vergangener Ereignissen ableiten lassen, auch für die Beschreibung der Gegenwart oder gar für die Erstellung von Prognosen geeignet ist.

Beide Verfahren schließen sich jedoch im Baubereich aus. Zum einen ist es sowohl bei der Fragestellung, die Verweilzeit von Bauprodukten im technosphärischen Zwischenlager zu schätzen, unmöglich, eine direkte Messung an Teilen vorzunehmen (dies schließt sich allein schon wegen der langen Zeiträume aus). Zum anderen sind die statistisch verfügbaren Daten bezüglich der Abgänge aus dem Baubereich weder vollständig noch differenziert genug, um hieraus statistisch belastbare empirische Daten für die Schätzung von Parametern zu gewinnen. Es ist daher erforderlich, eigene Modellannahmen über Ereignisse und Randbedingungen zu formulieren, aus denen eine Schätzung der Abgänge von Material aus dem Baubereich abgeleitet werden kann. Mit Hilfe dieser Annahmen kann dann versucht werden, bestimmte Verläufe von Ausfallwahrscheinlichkeiten zu begründen.

²⁴⁹ Eine Übersicht über die Verläufe von Weibull- und Normalverteilung findet sich in Abbildung 4.2

²⁵⁰ vgl. Küpper (1974, S. 359), zitiert in Meidlinger (1993, S. 141)

4.2.1.2 LEBENSDAUERN IM BAUBEREICH

Wie eingangs bereits erwähnt, bestehen nur sehr lückenhafte statistische Daten über das Abfallaufkommen im Baubereich. Ferner gibt es kaum Möglichkeiten, die Verweilzeit von Stoffen im Baubereich direkt zu bestimmen, da es aufgrund der langen Zeiträume keine unmittelbare Verknüpfung zwischen Input und Output gibt. Um sich zumindest ein Bild über den Umfang der gegenwärtig aus dem Baubereich abgehenden Mengen machen zu können und um eine Basis für die Aufstellung von Prognosen für zukünftige Massenströme zu besitzen, ist man daher auf die Formulierung von Annahmen und Hypothesen angewiesen.

Hypothese 1: Die Bauabfälle von morgen sind bereits heute vorhersehbar, denn sie werden aus den Gebäuden und der gebauten Umgebung gebildet. Es findet kein ungeplanter Austausch dieser Güter oder Stoffe mit der Umwelt statt.

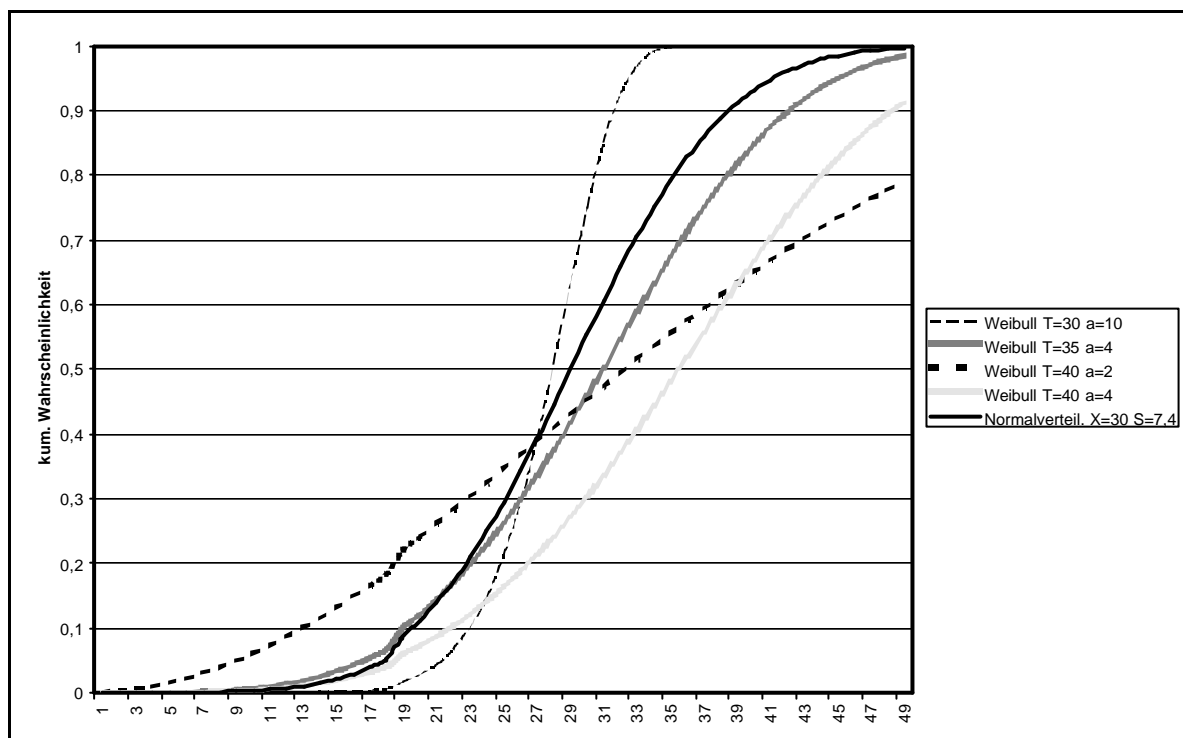


Abbildung 4.2: Verlauf der kumulierten Ausfallwahrscheinlichkeit für mehrere Weibull-Verteilungen und eine Normalverteilung mit Mittelwert 30

Auch wenn das Volumen der zukünftigen Bauabfälle bereits bekannt ist, bleiben Unsicherheiten über den Zeitpunkt und den Ort des Auftretens²⁵¹.

Hypothese 2: Bauabfälle entstehen im wesentlichen aus Baumaßnahmen, die bestimmten Gesetzmäßigkeiten unterliegen.

Es existieren Strategien zur Bewirtschaftung von Gebäuden in dem Sinne, dass ein Gebäude Erneuerungszyklen durchläuft, die von der Lebensdauer einzelner Bauteile bestimmt werden. Umfang und Zyklus von Baumaßnahmen, die diesen Gesetzmäßigkeiten folgen, sind dabei im wesentlichen abhängig von der Art der Nutzung des Gebäudes (Wohngebäu-

²⁵¹ Hier wird insbesondere auf die große statistische Lücke angespielt, die zwischen amtlicher Erfassung und vermutlichem tatsächlichem Abgang liegt

de, Nichtwohngebäude), der Intensität der Nutzung sowie der Altersklasse, der das Gebäude angehört²⁵².

Hypothese 3: Bei den Bewirtschaftungsstrategien treten zu bestimmten Zeitintervallen die Baumaßnahmen Renovierung, Modernisierung und Sanierung auf, denen jeweils ein unterschiedliches großes Bauschuttaufkommen zugeordnet werden kann.

Görg definiert diese drei Typen wie folgt²⁵³:

Unter **Renovierung** wird die Substanzerhaltung eines Gebäudes verstanden, so dass der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt wird. Hier findet in der Regel kein Ersatz von konstruktiven Bestandteilen statt, lediglich Innenausbauanteile werden ersetzt

Als **Modernisierung** bezeichnet Görg eine Renovierungsmaßnahme, die eine Substanzverbesserung zur Folge hat und eine technische Weiterentwicklung bewirkt. Ausgangspunkt einer Modernisierung ist häufig nicht das technische Versagen eines Bauteils, sondern die sozial-funktionale Komponente durch moderne Nutzungsansprüche hinsichtlich Komfort und Ästhetik.

Eine Abgrenzung zwischen Renovierung und Modernisierung findet sich in der sonstigen Literatur nicht. So fällt etwa die Teilerneuerung nach Ebel/Kahlert²⁵⁴ auch unter den Begriff der Modernisierung. Häufig wird auch der Begriff Umbau hierfür benutzt²⁵⁵. Durch den Vergleich der angenommenen Intervalle der baulichen Maßnahmen wird jedoch klar, dass die meisten anderen Autoren die Teilerneuerung mit der Modernisierung gleichsetzen, während Görg unter Renovierung tatsächlich einfache Maßnahmen wie etwa Tapezieren versteht.

Über die Zyklen liegen unterschiedliche Angaben vor, Andrä et al. sprechen von Zyklen von 30 Jahren für nichttragende Materialien²⁵⁶, Ebel/Kahlert definieren die Intervalle in Abhängigkeit der Gebäudenutzung sowie der Altersklasse, denen ein Gebäude zugeordnet ist (bei älteren Gebäuden gehen sie von Zyklen um 40 Jahre aus, für die meisten nach dem Zweiten Weltkrieg gebauten Gebäude gehen sie von 15-20 Jahren aus)²⁵⁷. BBR zitiert eine Reihe von Untersuchungen und kommt zu einem durchschnittlichem Erneuerungszyklus von 25-30 Jahren²⁵⁸. Görg schließlich nennt für einen Modernisierungszyklus 30 Jahre, die Renovierung sieht er regelmäßig nach 10 Jahren.

Unter **Sanierung** schließlich wird die Wiederherstellung der Funktionstüchtigkeit eines Gebäudes verstanden²⁵⁹. Sie ist damit eine Alternative zu Abbruch und/oder Neubau und mit dementsprechend großen Materialströmen, auch von tragenden Bauteilen, verbunden. Als Motivation zur Durchführung einer Sanierung nennt Görg Störfälle, individuelle Wünsche zur Bauwerkserhaltung (z.B. Fachwerk) oder neue Erkenntnisse über gesundheitsgefährdende Materialien (z.B. Asbest)²⁶⁰. In der Regel wird über die Lebensdauer eines Gebäudes eine

²⁵² Es sind natürlich noch weitere Einflussmöglichkeiten denkbar, da nicht alle Gebäudeeigentümer die gleiche Bewirtschaftungsstrategie anwenden (mancher lässt sein Gebäude verkommen, ein anderer wendet sehr viel Aufwand auf). Ferner sind auch andere Einflüsse wie modische Trends und Katastrophen (Krieg, Erdbeben) vorhanden, die jedoch nicht detaillierter betrachtet werden, da sie als klein gegenüber den üblichen Erhaltungsstrategien angesehen werden.

²⁵³ vgl. Görg (1996, S. 110 f.)

²⁵⁴ vgl. Ebel/Kahlert (1996, S. 4)

²⁵⁵ vgl. BBR (1998, S. 15) sowie die hier zitierten Untersuchungen

²⁵⁶ vgl. Andrä et al. (1994, S. 109)

²⁵⁷ vgl. Ebel/Kahlert (1996, S. 5)

²⁵⁸ vgl. BBR (1998, S. 15)

²⁵⁹ Ebel/Kahlert verwenden für Sanierung den Begriff Vollerneuerung (1996, S. 5)

²⁶⁰ Görg (1996, S. 111)

Sanierung vermutlich nur einmal durchgeführt, dabei dürften im Materialstrom alle nichttragenden Innenausbauteile sowie ein Teil der tragenden Bauteile zu finden sein.

Zur exakteren Bestimmung der Zyklen Teilerneuerung und Sanierung, die anschließend die Basis für das prognostizierte Aufkommen an Bauschutt aus Baumaßnahmen darstellen, ist sowohl die Berücksichtigung von bestehenden Zustandsprofilen des Gebäudebestands als auch des Verhaltens der Gebäudeeigentümer erforderlich. Hierzu wurde in Untersuchungen anhand des Gebrauchsverhaltens von Bauwerken das sogenannte „Strategiemodellverfahren“ entwickelt, wonach die Zyklen und der Umfang der Erhaltungsmaßnahmen wesentlich vom Gebrauchsverhalten abhängig sind und eine vorsorgende Erhaltungsplanung bedingen²⁶¹. Das per Expertenbefragung validierte Strategiemodell zeigt, dass das Gebrauchsverhalten tatsächlich signifikanten Einfluss auf die Zyklen besitzt, jedoch ergibt sich auch hier ein Wert von 20 - 40 Jahren für die Teilerneuerungen.

Hypothese 4: Bei der Lebensdauer von Gebäuden muss zwischen technischer, wirtschaftlicher und funktionaler Nutzungsdauer unterschieden werden. Dabei determiniert häufig die funktionale Nutzungsdauer die tatsächliche Lebensdauer.

Die **technische Lebensdauer** eines Bauwerks endet, sobald es nicht mehr nutzbar ist. Sie wird in der Regel von den Lebensdauern der einzelnen Bauteile bestimmt, weswegen häufig ein schleichender Verfall zu registrieren ist, wenn einzelne Bauteile bereits ausgefallen sind. Grundsätzlich kann die technische Lebensdauer durch eine hohe Qualität bei Planung und Bauausführung, durch nutzungsgerechten Gebrauch sowie durch geringe Beanspruchung durch äußere Einflüsse wie Feuchtigkeit, Luftschadstoffe und Schädlinge verlängert werden²⁶².

Die **wirtschaftliche Nutzungsdauer** endet, sobald es unwirtschaftlich ist, die Funktionsfähigkeit eines Bauwerks zu erhalten oder gar wiederherzustellen (vgl. Sanierung vs. Abriss und Neubau). Sie liegt in der Regel unterhalb der technischen Nutzungsdauer.

Die **funktionale Lebensdauer** bemisst sich nach der Eignung eines Gebäudes, bestimmte Anforderungen der Nutzer zu erfüllen. Hierzu gehören etwa Wohngebäude mit nicht nachgefragten Wohnungsgrößen und Betriebsgebäude mit ungünstigen Auslegungen für veränderte Betriebsabläufe. Die funktionale Lebensdauer ist häufig ausschlaggebend für die tatsächliche Lebensdauer eines Gebäudes, meistens in Kombination mit entsprechenden Wirtschaftlichkeitsüberlegungen.

Hypothese 5: Bauprodukte besitzen unterschiedlich lange Lebensdauern. Diese können für einzelne Bauteile sogar nach Verwendungszweck differieren. Die Schwankungsbreite um den jeweiligen Erfahrungsmittelwert ist für die meisten Bauprodukte sehr hoch.

Langlebige Bauteile sind solche, die in Tragkonstruktionen verwendet werden und praktisch keine Instandhaltung benötigen (z.B. Mauerwerk, Beton, Zimmermaterial). Ihre Lebensdauer entspricht der des gesamten Gebäudes, ein technisch bedingtes Lebensende eines dieser Bauteile kann zum Lebensende des gesamten Gebäudes führen²⁶³.

²⁶¹ Löffler/Schmuck (1985). Das zunächst für den Tiefbau entwickelte Strategiemodell wurde später von Hettenbach weiterentwickelt und auch auf den Hochbau übertragen. (Hettenbach, 1992, S. 76 ff.)

²⁶² Görg (1996, S. 120)

²⁶³ vgl. Andrä et al. (1994, S. 108) sowie Görg (1996, S. 114)

Teile des nichttragenden Ausbaus besitzen häufig eine mittlere Lebensdauer. Hierzu gehören nichttragende Innenwände, Putze, Estriche, Fliesen, Parketthölzer, Wärmedämmungen und Verglasungen. In der Regel werden diese Materialien im Zuge einer Modernisierung ausgetauscht und besitzen somit eine Lebensdauer von 25-40 Jahren²⁶⁴.

Kurzlebige Bauteile fallen im Zuge von Renovierungen als Bauschutt an, hierzu zählen Tapeeten, textile Bodenbeläge und Keramiken.

Tabelle 4.13 zeigt die Lebensdauerverteilungen von typischen Bauteilen. Die Spannen erklären sich aus unterschiedlichem Gebrauchsverhalten, wobei die dunkel markierte Fläche die regelmäßige durchschnittliche Lebensdauer der Bauteile aufgrund von Erfahrungswerten wiedergibt (i.d.R. bestimmt durch die funktionale bzw. wirtschaftliche Lebensdauer). Die hell markierte Fläche zeigt die maximale technische Lebensdauer auf, die unter bestimmten Bedingungen möglich ist (hohe Baustoffgüte, fachgerechte Ausführung, regelmäßige Pflege und Wartung, geringe Außenbelastungen). Die Daten werden vom Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau regelmäßig fortgeschrieben und im Bundesanzeiger veröffentlicht²⁶⁵.

Die Übersicht zeigt, dass langlebige Bauprodukte des tragenden Ausbaus in der Regel Lebensdauern von rund 100 Jahren haben, während die Produkte des nichttragenden Ausbaus bereits nach etwa 30-40 Jahren als Bauschutt anfallen. Die Übersicht zeigt jedoch auch, dass die Schwankungsbreiten zwischen der regelmäßigen Lebensdauer und der technisch möglichen Lebensdauer häufig 50 %, in Einzelfällen sogar bis zu 100 % betragen. Wäre zumindest der Zufluss in den Baubereich über alle Zeiten sowohl hinsichtlich der Mengen als auch hinsichtlich der Qualität und Zusammensetzung konstant, wäre dieser Sachverhalt vernachlässigbar, da sich die Schwankungen über die Zeit ausgleichen würden und sich im Mittel ein kontinuierlicher Abfallstrom einstellen würde. Da sich Mengen und Qualitäten jedoch laufend ändern, und die Verweilzeiten von Bauprodukten im Baubestand sehr groß sind, muss den starken Schwankungen bei einer mathematisch-statistischen Abbildung Rechnung getragen werden, indem versucht werden sollte, eine Beschreibung zu wählen, die am Anfang sehr wenige Ausfälle zu verzeichnen hat und anschließend nur eine leicht steigende Ausfallrate über die Zeit abbildet.

²⁶⁴ Aus der Gruppe der tragenden Bauteile zählen auch Dachziegel zu den im Rahmen von Modernisierungen ausgetauschten Materialien.

²⁶⁵ Kleiber (1991, S. 69 ff.) Veröffentlicht als Anlage 5: „Technische Lebensdauer von baulichen Anlagen und Bauteilen“ zur „Sammlung amtlicher Texte zur Wertermittlung von Grundstücken“.

Bauteilgruppe und Bauteile		Baustoffbezeichnung	Technische Lebensdauer typischer Baukonstruktionen in Jahren														
Gründung			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Fundamente, Bodenplatte	Stahl-, Stampfbeton																
	Bruch-, Ziegelstein in Mörtel																
Keller																	
Kelleraußenwände	Ziegel																
	Stahl-, Stampfbeton																
Tragkonstruktion																	
Stützen	Stahlstützen																
	Mauerwerkspfeiler																
	Stahlbetonstützen																
Außenwände																	
Geschöfswände	Ziegel																
	Bimsbeton																
	zweischalig																
Außenwand-bekleidungen	Stuckfassaden																
	glatter Putz																
	Ziegelsichtmauerwerk																
	Vormauerung																
vorgehängte Platten																	
Fenster	Holzfenster																
	Kunststoff-, Alufenster																
Innenwände			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
tragend	Ziegel																
	Ziegel / Kalksandstein																
nichttragend	Ziegel mit Fachwerk																
	Ziegel / Kalksandstein																
	Gips																
Decken und Bodenbeläge																	
Geschöfdecken	Holzbalkendecke																
	Ziegelkappendecke																
	Stahlbetondecke																
Fußböden	Holzdielen auf Tragbalken																
	Verbundestrich, Fliesen																
	Schwimm. Estrich, Dämmung																
	Linoleum, Kunststoffbeläge																
	Teppichbeläge																
Dach			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Dachkonstruktion	Holzdachstuhl																
	Flachdach																
Eindeckung	Tonpfannen																
	Betondachsteine																
	Folie/Pappe unter Dachhaut																
	Bitumenpappe																
	Kunststoffbahn, Dämmung																
Treppen																	
Geschöfstreppen	Holztreppen																
	Stahlbeton																
Schornstein																	
	Ziegelmauerwerk																
	Betonformstein																
Ausbau																	
Sanitär	WC, Waschtisch																
	Badewanne																
Heizung	Einzelofenheizung																
	Öl-, Gaszentralheizung																
Elektro	Leitung auf Putz																
	Leitung unter Putz																

Tabelle 4.13: Lebensdauer ausgewählter Bauteile²⁶⁶²⁶⁶ nach Kleiber (1991, S. 69 ff.), Görg (1996, S. 116)

Ähnlich wie für die Bewertung der Ausprägungen von Kriterien im Hinblick auf Dispersionsgrade gilt auch für die Zuordnung dieser Parameter, dass sie nicht über alle Zeiten konstant sein werden. So können folgende Ereignisse bei zukünftigen Betrachtungen eine Verschiebung der Parameterwerte bewirken:

1. Die fortschreitende technische Entwicklung oder veränderte Gebrauchsbedingungen verlängern die technische Lebensdauer eines Produkts. Dieser Aspekt ist nur bedingt relevant, da, wie bereits ausgeführt, nicht die technische, sondern die funktionale Lebensdauer die tatsächliche Lebensdauer bestimmt.
2. Die funktionale Lebensdauer wird durch sozio-ökonomische und psychologische Faktoren verändert (Ästhetik, Komfort, aber auch Kosten).
3. Eine verbesserte Erfassung von Bauschuttmengen erlaubt eine bessere Schätzung des Parameters α .
4. Die Nutzenbefriedigung der Volkswirtschaft erfolgt weniger materialintensiv als bislang. In diesem Fall wird versucht, die tatsächliche Lebensdauer der technischen Lebensdauer anzunähern und diese noch zu verlängern (Reparaturmaßnahmen, intensive Pflege, Versiegelung gegen Umwelteinflüsse etc.). Resultat wäre eine steigende mittlere Lebensdauer.
5. Neue Produkte kommen auf den Markt, alte Produkte verschwinden.

4.2.2 Die Darstellung der Verweilzeit als dynamischer Prozess

Während die vergangenen Ausführungen den Zeitpunkt des Verlassens eines Bauprodukts aus der Bausubstanz betrachteten und dabei die Lebensdauer von Bauprodukten als entscheidende Determinante identifizierten, muss zur vollständigen Betrachtung der Verweilzeit von Stoffen in Systemen auch eine Untersuchung des Eingangs in das System, hier als Verteilung des Bedarfs bzw. der Nachfrage, durchgeführt werden. Zu einem Zeitpunkt t tritt ein Stoff zusammen mit vielen anderen in das System ein und verbleibt dann für die Zeitspanne seiner Lebensdauer (Δt) im System, ohne sich zu verändern. Im Anschluss an seine Lebensdauer ($t + \Delta t$) tritt dieser Stoff zusammen mit anderen Stoffen wieder aus dem System aus und wird der Abfallwirtschaft zugeführt. Um eine derartige Systemdynamik untersuchen zu können, wird im Anschluss an die Betrachtung einiger Bedarfsparameter das aus der Sozialwissenschaft stammende Instrumentarium der Kohortenanalyse diskutiert und seine Anwendbarkeit auf die vorliegende Problemstellung untersucht.

4.2.2.1 ÜBERLEGUNGEN ZUR ENTWICKLUNG DES BEDARFS

Der Input von Stoffen in das System Bauwesen erfolgt grundsätzlich durch eine Bautätigkeit, die wiederum ausgelöst wird durch einen Bedarf bzw. eine Nachfrage nach Bautätigkeit. Grundsätzlich handelt es sich hierbei bei Vergangenheitsbetrachtungen um deterministische Ereignisse, die zuverlässig aus Statistiken entnommen werden können²⁶⁷. Will man jedoch ein Modell erstellen, aus dem ex ante Prognosen für zukünftige Bedarfsentwicklungen abgeleitet werden können, müssen die Einflussgrößen auf die Nachfrage analysiert und bewertet werden. An dieser Stelle soll die Diskussion dieser Einflussgrößen auf einige wenige Grundzüge beschränkt werden, um Zuflüsse in dynamischen Systemmodellen besser verständlich

²⁶⁷ vgl. Angaben der Statistischen Ämter sowie Verbandsangaben zu Baufertigstellungen

zu machen. Der Frage, wie diese Einflussgrößen auf die Nachfrage gestaltet werden können, widmet sich Kapitel 6.

Nachfrageprognosen sind für langlebige Konsumgüter wie Autos oder Fernsehgeräte traditionell üblich. Dabei wird ausgehend vom bisherigen Bestand eine spezifische Kennziffer ermittelt (z.B. Anzahl der Pkw je Einwohner) und hieraus die zu erwartende Nachfrage unter Berücksichtigung von Randparametern prognostiziert. Im Baubereich werden drei grundlegende Effekte unterschieden²⁶⁸:

1. Ersatznachfrage

Da alle Güter am Ende ihrer durchschnittlichen Lebensdauer ausscheiden, verringert sich der Güterbestand ständig. Jener Teil der Nachfrage, welcher diesen Abgang kompensiert, wird als Ersatznachfrage definiert. Eine langfristige Prognose der Ersatznachfrage setzt Kenntnisse über Mengen, Restlebensdauern und Zusammensetzungen des Bestands voraus.

Im Rahmen der Bauwirtschaft gehören hierzu auch die Ersatznachfragen aufgrund von Sanierungen und Renovierungen, die mit Ziel durchgeführt werden, die Nutzbarkeit des Gebäudes aufrecht zu erhalten.

2. Bevölkerungsnachfrage

Eine Veränderung von Bevölkerungsparametern (Einwohner, Altersstruktur, Haushaltsstruktur) führt zu einer Veränderung der Anzahl potenzieller Nutzer. Jener Teil der Nachfrage, der der Anpassung des Güterbestands an eine veränderte Anzahl potenzieller Nutzer zuzuordnen ist, wird als Bevölkerungsnachfrage definiert. Für eine langfristige Prognose ist die Kenntnis von soziodemographischen Daten erforderlich.

Für die Bauwirtschaft ist Bevölkerungsnachfrage gleichzusetzen mit der Kompensation der spezifischen Kennziffer Wohnfläche pro Einwohner bei steigender Bevölkerung und somit direkt proportional zur Änderung der Bevölkerung.

3. Ausstattungsnachfrage

Als Ausstattungsnachfrage wird die Veränderung des Ausstattungsgrads der Nutzer definiert. Maßgeblich für die langfristige Entwicklung sind makroökonomische Daten wie die Einkommensentwicklung, die Einkommensverteilung und die gesamtwirtschaftliche Entwicklung sowie die Nutzenpräferenzen der Konsumenten.

Im wesentlichen korreliert die Ausstattungsnachfrage mit einem Anstieg der Kennziffer Wohnfläche pro Einwohner und dem daraus resultierenden physischen Bauvolumen.

Zur Ableitung des voraussichtlichen Inputs an Bauprodukten in den Baubestand werden die aus den einzelnen Nachfragearten resultierenden physischen Bauvolumina mit spezifischen Materialeinsatzkennziffern verknüpft, die aufgrund von Erfahrungen aus der jüngsten Vergangenheit bekannt sind. So lässt sich etwa aus der Statistik entnehmen, dass im Jahr 1996 eine bestimmte Menge X an Beton in den Hochbau zur Fertigstellung von Y m² Wohnfläche bzw. Nutzfläche verbraucht wurde. Derartige Zeitreihenfortschreibungen bergen jedoch eine Reihe von Unsicherheiten:

- Der Bedarf zum Ersatz im Rahmen von Sanierungs- und Modernisierungsaktivitäten führt nicht zu einer statistischen Erhöhung der fertiggestellten Fläche und ist somit vom Ver-

²⁶⁸ vgl. Behring et al. (1989, S. 3 f.), BBR (1998, S. 24)

Verbrauch des Gutes abzuziehen. Dies ist insbesondere im Rahmen von nichttragenden Bauprodukten von erheblicher Relevanz.

- Die Materialzusammensetzung bei der Erstellung von Gebäuden ändert sich in kurzen Abständen, weswegen die Validität der Trendaussage immer nur für kurze Zeiträume gilt²⁶⁹. In diesem Zusammenhang sind auch die Neuentstehung und das Verschwinden von Produkten vom Markt sowie damit einhergehende Marketingaktivitäten mit ihren Auswirkungen auf die Konsumentenpräferenzen zu beachten.
- In Zukunft ist verstärkt der Einsatz von Sekundärmaterialien für die Produktherstellung statistisch zu berücksichtigen²⁷⁰, auch wenn dieser Zweig zur Zeit noch keinen signifikanten Einfluss auf das Gesamtangebot hat.
- Es sind grundsätzlich Sättigungsgrenzen zu berücksichtigen²⁷¹.

Auf der Basis der Einflussfaktoren aus Ersatz, Ausstattung und Bevölkerungswachstum wurden einige Prognoseszenarien für den zukünftigen Baubedarf erstellt²⁷². Diese Daten werden später herangezogen, um mit Hilfe der Kohortenanalyse Aussagen über das zu erwartende dynamische Verhalten von Gipsprodukten im System Baubereich ableiten zu können.

4.2.2.2 DIE KOHORTENANALYSE

Um ein Modell für die Planung von Menge, Qualität und Zeitpunkt des Auftretens von Produkten aus einem Black-Box-System zu erhalten, muss zunächst die Struktur des Bestands zu einem Startzeitpunkt erfasst und anschließend mit Hilfe der Dynamik der Zu- und Abgänge fortgeschrieben werden, wobei der Prognose zukünftiger dynamischer Prozesse eine erhebliche Bedeutung zukommt. Ein Werkzeug zur Beschreibung von zeitlichen Veränderungen dynamischer Bestände mit Zu- und Abflüssen, das gleichzeitig die Veränderungen im Zeitablauf analysiert und daraus Implikationen für zukünftige Entwicklungen ableitet, ist die Kohortenanalyse²⁷³.

Die Kohortenanalyse entstammt ursprünglich der Soziologie und Bevölkerungswissenschaft, wo sie zur Erforschung der Veränderung von Gesellschaftsprozessen, der Betrachtung von Alterungsprozessen sowie zur Erklärung des intergenerationalen Wertewandels eingesetzt wird²⁷⁴. Dabei wird eine Population (die gesamte Gesellschaft oder nur Teile hiervon) in verschiedene Kohorten segmentiert, wobei für eine Kohorte das Merkmal charakteristisch ist, dass ihre Mitglieder im Sinne eines gleichartigen Auslöseereignisses gleichaltrig sind. Dieses Auslöseereignis kann neben der Geburt („Geburtskohorte“) auch ein bestimmtes Lebensereignis wie Wohnungswechsel oder Kauf eines Produkts sein²⁷⁵. In den Sozialwissenschaften liegt der Schwerpunkt der analytischen Betrachtungen dabei weniger auf dem äußeren Auslöseereignis als solchem, sondern vielmehr auf den gemeinsamen prägenden Merkmalen

²⁶⁹ In den letzten Jahren hat z.B. der Baustoff Holz wieder eine viel größere Verwendung im Vergleich zu Beton gefunden, ähnliches gilt für die Verwendung von Gipsprodukten.

²⁷⁰ Schultmann (1998, S. 237) merkt an, dass das Recyclingpotenzial von Hochbaurestmassen noch nicht annähernd ausgeschöpft ist und sich durch einen selektiven Rückbau deutlich steigern ließe (in einem Pilotprojekt auf 97 %).

²⁷¹ vgl. Meidlinger (1993, S. 186)

²⁷² Behring et al. (1989, S. 11 ff), ITAS/ifib (1998, S. 245 ff.), BBR (1998), Glenck et al. (1996)

²⁷³ Eine umfassende Darstellung der Theorie und Werkzeuge der Kohortenanalyse findet sich bei Weißner (1989), ferner in komprimierter Form bei Wimmer (1995, Sp. 1153-1166). Die Arbeit von Weißner war auch richtungsweisend für den verstärkten Einsatz von Kohortenanalysen in der Marktforschung, vgl. hier die Arbeiten von v. Ahsen (1990), Peiser (1991) sowie Horn (1995)

²⁷⁴ vgl. Horn (1995, S. 29)

²⁷⁵ vgl. v. Ahsen (1990, S. 51)

und Erfahrungen der Mitglieder einer Kohorte²⁷⁶. Dabei ist es Aufgabe der Kohortenanalyse, geeignete Kohorten zu identifizieren, die eine Erklärung für ein Verhalten liefern können.

Die Kohortenanalyse basiert auf drei Bezugselementen, die miteinander in Beziehung stehen: Alter, bezogen auf das Auslöseereignis; Periode, mit der ein Betrachtungszeitraum charakterisiert ist, während dem alle Mitglieder der gesamten Grundgesamtheit den gleichen äußeren Einflüssen zur gleichen Zeit und mit gleicher Intensität ausgesetzt sind; Kohorte, mit der die Einzigartigkeit von verschiedenen Gruppen im Zeitablauf charakterisiert wird²⁷⁷. Ziel der Kohortenanalyse ist die Beschreibung der Richtung und Stärke von Einflüssen, die von den drei als erklärende Einflussfaktoren angesehenen Bezugselementen Alter, Periode und Kohorte ausgehen. Sind Effekte bei den abhängigen Variablen feststellbar, wird kausalanalytisch versucht, diese einem der drei Bezugselemente zuzuordnen und die Ursachen zu ermitteln, die über die Bezugselemente zu den Effekten geführt haben, wie z.B. Änderungen im Verhalten.

Besonderes Augenmerk wird bei der Kohortenanalyse auf die sogenannte Kohortensukzession gelegt, d.h. die Entstehung neuer und das Vergehen existierender Kohorten. Somit ist es möglich, dynamische Aspekte der Wanderung der Kohorten durch Perioden und Altersklassen zu erfassen und beobachtete Effekte zu analysieren. Diese Schwerpunktsetzung ist für die Betrachtung dynamischer Systeme mit laufenden Zuflüssen (Geburten) und Abflüssen (Tod) geeignet, um die Bestandsentwicklung eines Produkts darzustellen und für die Zukunft Prognosen anzustellen.

Ausgangspunkt einer kohortenanalytischen Betrachtung ist zunächst die Aufstellung von zweidimensionalen Kohortentabellen mit den Achsen Alter (bzw. Altersklassen) und Periode, wobei für jede der beiden Achsen mindestens zwei Messungen vorliegen müssen, um kohortenanalytische Untersuchungen anstellen zu können. Ferner müssen die Abstände zwischen zwei Alterspunkten und zwei Periodenpunkten übereinstimmen bzw. Altersklassen und Periodenklassen jeweils das gleiche Zeitintervall abdecken. Nur so kann auch eine Kohorte in ihrer Entwicklung über die Zeit verfolgt werden.

Allgemein sieht die Schreibweise für eine Kohortentabelle wie folgt aus. Die Tabelle basiert auf den beiden Dimensionen, die folgende Ausprägungen haben: die Alterspunkte bzw. die Altersklassen $A_0 \dots A_n$ auf der Ordinate sowie die Perioden $P_0 \dots P_t$ auf der Abszisse. Dabei muss zwischen allen Alterspunkten und allen Periodenpunkten das gleiche Zeitintervall liegen: $A_1 - A_0 = A_2 - A_1 = \dots = A_n - A_{n-1} = P_1 - P_0 = P_2 - P_1 = \dots = P_t - P_{t-1}$. Handelt es sich um Klassen, muss das Intervall jeder Klasse eine identische Größe besitzen.

Zu dem Funktionspaar (A, P_j) gibt es einen Wert B_{ji} , der die Größe derjenigen Kohorte beschreibt, die in der Periode j das Alter i besitzt (bzw. der Altersklasse i zugeordnet ist). Werden alle B_{ji} einer beliebigen Periode j addiert, so erhält man den Gesamtbestand an Produkten in dieser Periode $B_{j\cdot}$ sowie deren Altersverteilung. Verknüpft mit der Altersverteilung, lässt sich hieraus das mittlere Alter der Produkte \underline{B}_j in jeder beliebigen Periode bestimmen.

²⁷⁶ Definiert man z.B. einen Wohnungswechsel in ein Neubaugebiet als Auslöseereignis, so sind alle Mitglieder einer Kohorte bezogen auf dieses Ereignis gleichaltrig, wenn der Umzug zum Zeitpunkt des Neubaus erfolgte. Später hinzugezogene bilden eine eigene Kohorte, die sich bezüglich bestimmter Ereignisse (z.B. Planung eines Straßenneubaus) völlig anders verhalten können als die Personen der ersten Kohorte. Das Verhalten der Mitglieder der ersten Kohorte wird also wesentlich von den gemeinsamen Erfahrungen geprägt, die seit dem Umzug vergangen sind. Der Umzug selbst ist dann kein Verhalten erklärendes Ereignis mehr.

²⁷⁷ Zunächst ist die Kohorte, bezogen auf einen Zeitpunkt, durch die Variablen Alter und Periode ausreichend charakterisiert. Erst durch die Dynamik im Zeitablauf können eigenständige Kohorten mit einem eigenständigen Charakter entstehen.

Werden alle B_{ji} einer beliebigen Altersklasse i aufaddiert und durch die Gesamtzahl aller Perioden t geteilt, so erhält man den durchschnittlichen Bestand \underline{B}_i von Produkten einer Altersklasse in einer Periode.

Periode Alter	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P _{...}	P _t	S B _i	<u>B</u> _i
A ₀	B _{0,0}	B _{1,0}	B _{2,0}	B _{3,0}	B _{j,0}	B _{t,0}	B _{· 0}	<u>B</u> _{· 0}
A ₁	B _{0,1}	B _{1,1}	B _{2,1}			B _{t,1}	B _{· 1}	<u>B</u> _{· 1}
A ₂	B _{0,2}	B _{1,2}	B _{2,2}			B _{t,2}	B _{· 2}	<u>B</u> _{· 2}
A ₃	B _{0,3}					B _{t,3}	B _{· 3}	<u>B</u> _{· 3}
A _{...}	B _{0,i}					B _{t,i}	B _{· i}	<u>B</u> _{· 4}
A _n	B _{0,n}	B _{1,n}	B _{2,n}	B _{3,n}	B _{j,n}	B _{t,n}	B _{· n}	<u>B</u> _{· 5}
S B _j	B _{0 ·}	B _{1 ·}	B _{2 ·}	B _{3 ·}	B _{j ·}	B _{t ·}		
<u>B</u> _j	<u>B</u> _{0 ·}	<u>B</u> _{1 ·}	<u>B</u> _{2 ·}	<u>B</u> _{3 ·}	<u>B</u> _{j ·}	<u>B</u> _{t ·}		
<i>i Altersklassen, i = 1,..., n</i>								
<i>j Perioden, j = 1,..., t</i>								
<i>Die Darstellung einer Zeilensumme B_{· j} ist nicht sehr aussagekräftig.</i>								

Tabelle 4.14: Kohortentabelle mit Darstellung von Zeilen- und Spaltenmitteln²⁷⁸

Ausgehend von Periode 0 kann man den Verlauf der Kohorte $B_{0,0}$ auf der Diagonalen verfolgen. Diese Kohorte beschreibt alle Elemente, die im Laufe der Periode 0 der Altersklasse 0 zuzuordnen waren (also z.B. 0-2 Jahre alt waren). Beim Übergang zur folgenden Periode 1 nach 2 Jahren wandern die Elemente aus dieser Kohorte in die nächste Kohorte $B_{1,1}$, die alle Elemente beschreibt, die im Laufe dieser Periode der Altersklasse 1 zuzuordnen sind (also z.B. 2-4 Jahre). Die Elemente einer Kohorte wandern also im Zeitablauf diagonal von oben links nach unten rechts.

Zur Analyse einer derartigen Kohortentabelle stehen folgende Methoden zur Verfügung²⁷⁹:

Die Vertikal- bzw. Querschnittsanalyse untersucht und interpretiert die Bestandsdaten in einer bestimmten Periode. Sie zeigt den Gesamtbestand eines Elements in der Periode, seine Altersverteilung sowie das durchschnittliche Alter der Elemente. Dynamische Effekte können hiermit nicht betrachtet werden.

Die Horizontal- bzw. Zeitwandelanalyse untersucht gleiche Altersgruppen zu verschiedenen Zeitpunkten und fragt nach möglichen Unterschieden in den Ausprägungen. Die Zeitwandelanalyse ist geeignet, die unterschiedlichen Besetzungen der einzelnen Altersklassen im Zeitverlauf zu prognostizieren.

Die Diagonal- bzw. Längsschnittanalyse stellt die eigentliche Kohortenverfolgung über mehrere Perioden hinweg dar und ergibt eine Analyse des Lebenszyklus dieser Kohorte von der Geburt bis zum Tod (Kohortensukzession).

²⁷⁸ In Anlehnung an eine Darstellung von Meidlinger (1993, S. 188)

²⁷⁹ vgl. Weißner (1989, S. 90 f.), v. Ahsen (1990, S. 96), Meidlinger (1993, S. 174), Horn (1995, S. 93 ff.), Wimmer (1995, Sp. 1161)

Die Interpretation der Kohortentabelle durch Herstellung einer Kausalbeziehung zwischen einem vermuteten Effekt und der zugrunde liegenden Ursache bereitet häufig große Schwierigkeiten, da eine Ursache nicht eindeutig isoliert werden kann. Dennoch gibt es zu jeder der drei Bezugselemente klassische Effekte, die nur auf dieses eine Bezugselement bezogen werden können. Wird ein solcher Effekt in der Kohortentabelle registriert, kann eine Kausalzuordnung durchgeführt werden.

Der Alterseffekt kennzeichnet charakteristische Merkmale und Ausprägungen einzelner Altersklassen, die über alle Perioden hinweg konstant sind und die Prognose erlauben, dass zukünftige Entwicklungen der Ausprägungen allein durch Altersunterschiede zu erklären sind. Ein reiner Alterseffekt liegt zum Beispiel vor, wenn die Wahrscheinlichkeit, einen Herzinfarkt zu bekommen, in der Altersklasse 20-29 immer bei 1 %, in der Altersklasse 30-39 immer bei 5 %, in der Altersklasse 40-49 immer bei 15 % und in der Altersklasse 50-59 immer bei 20 % liegt, und zwar sowohl zum Beobachtungszeitpunkt 1950 als auch 1980 oder 1995. Für Produkte charakterisiert der Alterseffekt den Produktlebenszyklus. Reine Alterseffekte sind in der Praxis allerdings selten.

Als Periodeneffekt wird die altersunabhängige gleichmäßige Einwirkung äußerer Ereignisse auf alle Altersgruppen bezeichnet. Im soziologischen Sinne war der Periodeneffekt etwa nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl auf die Frage nach der Zustimmung zur Kernenergie festzustellen. Bei Produkten wäre ein Periodeneffekt etwa beim Pkw-Bestand denkbar, wenn der Benzinpreis verdoppelt werden würde. Reine Periodeneffekte sind in der Praxis ebenfalls kaum anzutreffen. Der von ihnen ausgehende „Memory-Effekt“ kompensiert sich oft nach einigen Jahren wieder (vgl. etwa Zustimmung zur Kernenergie).

Kohorteneffekte beschreiben die Einzigartigkeit jeder Kohorte. Es wird hierbei unterschieden zwischen statischen Kohorteneffekten (z.B. in Abhängigkeit vom Geburtsjahr zeigen Kohorten bei einem bestimmten Alter unterschiedliche Reaktionen auf äußere Einflüsse) und dynamischen Kohorteneffekten, die die differenzierte Entwicklung von Kohorten im Zeitablauf kennzeichnen. Sie sind meist sehr schwer zu isolieren und ermöglichen keine verursachungsgerechte Zuordnung auf Alters-, Perioden- und Kohorteneffekte.

Möglichkeiten zur Isolierung von Einzeleffekten sollen an dieser Stelle nicht vertieft diskutiert werden, es sei darauf hingewiesen, dass grundsätzlich nach qualitativ-interpretativen Ansätzen (visuelle Inspektion, Bildung von Subkohorten) und quantitativ-statistischen Ansätzen (Differenzenverfahren, regressionsanalytische Verfahren, Kombination mit Zeitreihen-Extrapolationen) unterschieden wird²⁸⁰.

Die Eignung der Kohortenanalyse zur Abbildung der Bestandsentwicklung von Produkten und als Prognoseinstrument zur Bestandsfortschreibung in einem dynamischen System ist also gegeben, da folgende Eigenschaften und Voraussetzungen erfüllt sind²⁸¹:

1. Das auslösende Ereignis tritt nicht nur einmalig auf, sondern kehrt immer wieder: Der Zufluss (die „Geburt“) von Produkten in den Bestand ist kontinuierlich²⁸².
2. Die Kohorte verlässt nach einer Verweilzeit den Bestand (sie „stirbt“).

²⁸⁰ vgl. Weißner (1989, S. 107 ff.), v. Ahsen (1990, S. 228), Horn (1995, S. 105 ff.)

²⁸¹ vgl. Meidlinger (1993, S. 189), Horn (1995, S. 73)

²⁸² Diese Prämisse gilt natürlich nur mit Einschränkung. Manche Produkte werden im Laufe der Zeit nicht mehr produziert werden, weswegen von ihnen kein Zufluss mehr ausgeht. Auf der stofflichen Ebene des Gipses kann jedoch weiterhin mit einem kontinuierlichen Eintrag gerechnet werden.

3. Es lassen sich mindestens zwei zeitlich voneinander getrennte Untersuchungen über die Größe der einzelnen Kohorten durchführen: In einem „Durchflussreaktor“ mit laufenden Zu- und Abgängen kann zu jeder beliebigen Zeit eine Messung der Kohortengrößen an- gestellt werden.
4. Der Gesamtbestand der Population ist nach Altersklassen gegliedert.

In Kapitel 5 erfolgt die Anwendung der kohortenanalytischen Darstellung auf den Bestand an Gipsprodukten.

4.3 Die Größe des Baustofflagers

In Kapitel 3.2 ist bereits ausführlich auf die Problematik der Bestimmung der Mengen im Sys- tem Bauwesen hingewiesen worden. Die unbefriedigende Datenlage von Stoffströmen im Bauwesen wirkt sich am gravierendsten bei der Bestimmung des Bestandes aus, da hier die bei weitem größten Mengen gespeichert sind, die Verweilzeiten sehr lang sind und schon kleine methodische Ungenauigkeiten oder Schätzfehler zu erheblichen Fehlinterpretationen führen können. Auch im Vergleich zu anderen Wirtschaftssektoren dominieren die im Bau- wesen bewegten und gespeicherten Mengen die technosphärischen Stoffströme und Stofffla- ger erheblich, teilweise bis zu 80 %. Eine direkte Erhebung der Baustoffmengen und Bau- stoffkonzentrationen im Stofflager ist nicht möglich, weswegen auf die zum Teil messbaren Inputströme und die nur pauschal erfassten und vermutlich viel zu niedrig gemessenen Out- putströme zurückgegriffen werden muss. Beim Rückgriff auf den Input bereitet jedoch schon die Ermittlung des Bestands und des Stofflagers von Gebäuden, die vor 1945 errichtet wur- den, fast unlösbare Schwierigkeiten; diese Gebäude machen aber immer noch über 40 % der Nutzfläche im gesamten Hochbau aus²⁸³. So kamen Glenck et al. trotz der Verwendung von 12 verschiedenen Datenquellen zu Input, Bestand und Output aus dem Bauwesen zu einer Schwankungsbreite mit dem Faktor 3 bei der Abschätzung des Stofflagers im Hoch- und Tiefbau in Österreich²⁸⁴.

ITAS/ifib haben daher für die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages eine Unter- suchung der Stoffströme im Bauwesen angestellt, die auf zwei unterschiedlichen Vorge- hensweisen beruht. Während im „Top-Down“-Ansatz versucht wird, anhand von möglichst allgemein verfügbaren Statistiken aus zum Teil hoch aggregierten Daten die Stoffströme und das Stofflager zu bestimmen, versucht der „Bottom-Up“-Ansatz die Einteilung des vorhande- nen Gebäudebestands in Substanzgruppen mit gleichen Eigenschaften, entwickelt für jede dieser Substanzgruppen typische Vertreter und die dazu gehörenden Baustoffmengen und rechnet auf der Grundlage dieser Einzeldaten Stoffströme und Stofflager hoch. Die Resultate der beiden Ansätze weisen zum Teil erhebliche Differenzen auf. Validierung und Abgleich sind aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen und der unbefriedigenden Datenlage erst teilweise gelungen. So beträgt das Verhältnis Input/Output im Top-Down-Ansatz annähernd 10, im Bottom-Up-Ansatz jedoch lediglich 2. Dies ist sowohl auf eine um den Faktor 2,5 hö-

²⁸³ vgl. ITAS/ifib (1998, S. 27). Ende Dezember 1991 waren in Deutschland 5,3 Mrd. m² Nutzfläche ausgewiesen, von denen 2,3 Mrd. m² in Gebäuden lagen, die vor 1948 errichtet wurden.

²⁸⁴ vgl. Glenck et al. (1996, S. ii). Für das Lager wird ein Mittelwert von 400 t/Einwohner mit einer Bandbreite zwischen 180 t/EW und 550 t/EW geschätzt.

here Schätzung des Inputs im Top-Down-Ansatz als auch auf eine um den Faktor 2 höhere Schätzung des Outputs im Bottom-Up-Ansatz zurückzuführen²⁸⁵.

Aufgrund der erheblichen Bedeutung der Datenqualität für die Folgerungen aus dem Prognosemodell werden im folgenden kurz die Grundzüge des Top-Down-Verfahrens sowie des Bottom-Up-Verfahrens vorgestellt und einer kurzen Bewertung unterzogen, sowohl allgemein als auch im Hinblick auf die hier behandelte Fragestellung.

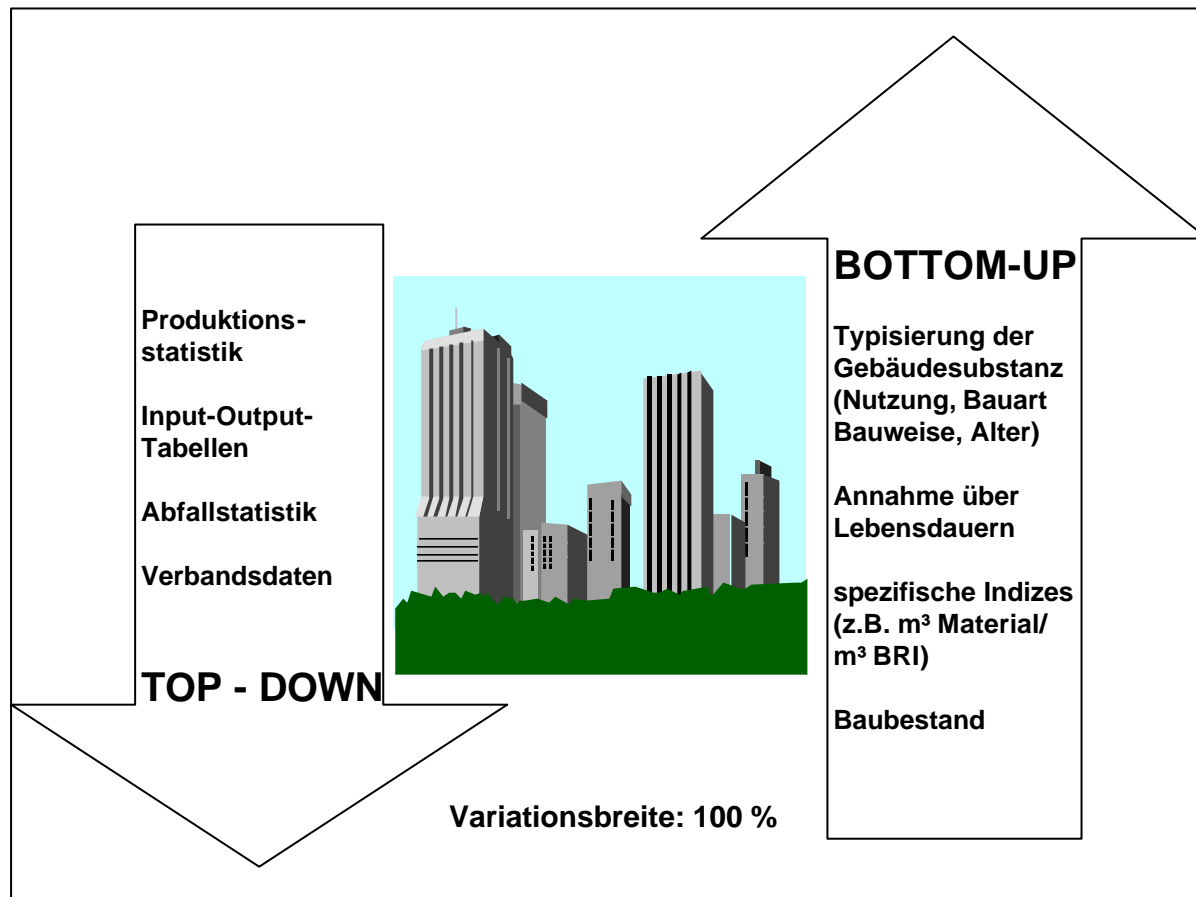


Abbildung 4.3: Ansätze zur Bestimmung von Stoffströmen und Stofflagern im Bauwesen

4.3.1 Das Top-Down-Verfahren zur Quantifizierung von Stoffströmen und -lagern im Bauwesen

Die folgenden Ausführungen beziehen sich im wesentlichen auf die von ITAS/ifib durchgeführte Studie für die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages zur Erfassung von Stoffströmen und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen, an der der Autor mitgewirkt hat²⁸⁶.

Grundlage des Top-Down-Ansatzes sind aggregierte Daten aus allgemein zugänglichen Statistiken wie etwa der Produktionsstatistik²⁸⁷, der Statistik der Baufertigstellungen eines Jah-

²⁸⁵ Der Bottom-Up-Ansatz vernachlässigt aus verschiedenen Gründen (fehlende Information, Abschneidekriterien) einige Ströme. Er stellt also eine untere Grenze dar. Der Top-Down-Ansatz ist umfassend, er stellt eine obere Grenze dar. (ITAS/ifib, 1998, S. 56)

²⁸⁶ ITAS/ifib (1998, S. 39 ff. sowie S. 84 ff.)

²⁸⁷ Statistisches Bundesamt (1997b)

res, Statistiken von Verbänden oder Fachbehörden sowie Erhebungen des Statistischen Bundesamtes über die Vorleistungen einzelner Wirtschaftsbereiche für die Bauwirtschaft. Um aus diesen aggregierten Daten relevante Detailinformationen ableiten zu können, sind zusätzliche Angaben erforderlich, die in manchen Fällen nicht allgemein zugänglich sind oder geschätzt werden müssen.

Der Rückgriff auf die Produktionsstatistik des Statistischen Bundesamtes erweist sich jedoch als wenig geeignet, da aufgrund der vielen in der Bauwirtschaft bestehenden Klein- und Kleinstbetriebe ein erhebliches Risiko der Nichtberücksichtigung von Mengen besteht²⁸⁸. Um diese Problematik auszuschließen und gleichzeitig mit den gleichen statistischen Daten sowohl Stoffströme auch Energieverbrauchswerte sowie „ökologische Rucksäcke“²⁸⁹, die durch die Bautätigkeit insgesamt verursacht werden, berechnen zu können, wird auf Statistiken zurückgegriffen, die für die Abbildung von wirtschaftlichen Verflechtungen zwischen Wirtschaftsbereichen in Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes herangezogen werden²⁹⁰. Aus der Input-Output-Statistik werden diejenigen Bauleistungen identifiziert, die durch die Wirtschaftssektoren „Hoch- und Tiefbau“ sowie „Ausbau“ erbracht werden sowie die Vorleistungen, die andere Sektoren an diese beiden Sektoren im Baugewerbe erbracht haben. Diese Input-Output-Tabellen werden auf Koeffizienten und zugehörige Mengen transformiert, um so durch Anwendung von Matrizenrechnung die zum Teil komplexen Vorleistungswege über mehrere Wirtschaftssektoren hinweg ermitteln zu können²⁹¹. So kann abschließend für jeden Wirtschaftssektor dessen Beitrag zum Verwendungszweck Bauen bestimmt werden, sowohl bezogen auf die Stoffströme als auch auf die Energieverbräuche und die zugehörigen Emissionen.

Für das Jahr 1991 ergaben sich nach den Berechnungen der Top-Down-Vorgehensweise insgesamt 314,3 Mio. t an Gütern, die in die Bereiche Hochbau und Ausbau geflossen sind. Der weitaus überwiegende Teil hiervon entfällt auf die Steine- und Erden-Industrie (288 Mio. t), wobei Sand und Kies (87 Mio. t) zur Herstellung von Ortbeton und Transportbeton (83 Mio. t) die größten Einzelposten darstellen.

Zur Bestimmung der Abfallmengen und Abfallarten aus dem Bauwesen wurde die amtliche Statistik²⁹² des Statistischen Bundesamts herangezogen, in der zwar sämtliche Daten zu Abfällen gemäß des Abfallkatalogs der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) erfasst, jedoch nicht nach Herkunftsbereichen getrennt sind. Dazu wurden für den Baubereich relevante Abfallarten aus der Statistik identifiziert und addiert. Zu diesen Abfallarten, bei denen eine Verbindung zum Baubereich teilweise oder vollständig vorliegt, gehören die Kategorien Bauschutt, Bauschutt gemischt, Bodenaushub, Gipsabfälle, Asbestzementabfälle, Mineralische Schlämme, Baustellenabfälle sowie Straßenaufbruch²⁹³. Korrekturbedarf durch die Ab-

²⁸⁸ Die amtliche Statistik erfasst nur Betriebe mit mindestens 20 Mitarbeitern. Im Bauhauptgewerbe arbeiten jedoch 33 % der Beschäftigten in Betrieben mit weniger als 20 Mitarbeitern, eine nicht vernachlässigbare Quantität.

²⁸⁹ Unter einem ökologischen Rucksack sollen alle Umweltbeeinträchtigungen verstanden werden, die im Lebenszyklus eines Produkts anfallen und zum Teil auch von vorgelagerten Wertschöpfungsstufen erbracht werden. Hierzu gehören beispielsweise Energieaufwendungen bei der Gewinnung von Rohstoffen und Hilfsstoffen aus der Natur, Transportvorgänge etc. Intensiv befassen sich hiermit Studien zur Ökobilanzierung von Baustoffen, etwa bei Kohler (1991, S. 55 ff.), BUWAL (1995) sowie für einzelne Produkte wie Wärmedämmstoffe bei Richter et al. (1995)

²⁹⁰ Insgesamt besteht die Input-Output-Tabelle aus einer quadratischen Matrix mit 58 Zeilen und Spalten für jeden Wirtschaftsbereich, aufgeteilt in 1600 Güter und 1400 Dienstleistungen. Abzulesen sind die jeweiligen Mengen an Energie, Gütern und Dienstleistungen (angegeben in Geldeinheiten), die zwischen den Bereichen ausgetauscht wurden.

²⁹¹ Ein Beispiel zur Anwendung der Input-Output-Rechnung zur Darstellung von Stoffflüssen liefert Münch (1997) am Beispiel von Blei.

²⁹² Statistisches Bundesamt (1997a)

²⁹³ Am Beispiel Gipsabfälle kann gezeigt werden, dass die Heranziehung der Abfallstatistik mit großen Unsicherheiten und Fehlern behaftet ist, denn zum einen sind in dieser statistischen Kategorie neben den Gipsabfällen aus der Herstellung von

schneidegrenze der Erfassung bei Betrieben mit mehr als 20 Beschäftigten wurde nicht gesehen, da das zusätzliche Abfallaufkommen unter 10 % erwartet wird, was angesichts der großen Unsicherheiten keine zusätzlichen Erkenntnisse bringt. Die gesamte im Jahr 1990 angefallene Abfallmenge aus dem Hochbaubereich beträgt lt. Statistik 31,9 Mio. t an Bauschutt und Baustellenabfällen, hinzu kommen 98,9 Mio. t an Bodenaushub.

Der Top-Down-Ansatz zur Bestimmung der Stoffströme bietet einige Vorteile:

- Allgemein zugängliche Daten können genutzt werden, die auch die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Autoren begünstigen
- Daten, die auf allgemeinen Statistiken beruhen, eignen sich sehr gut für die Durchführung von Analysen zur Veränderung des Untersuchungsgegenstands im Zeitablauf
- Der Top-Down-Ansatz ist gut geeignet zur Gewinnung einer Problemübersicht sowie zur Beantwortung von Fragestellungen nach Systemzusammenhängen und Auswirkungen von Einflussgrößen auf einer aggregierten Ebene
- Die Integration weiterer Analysen ist möglich, etwa zur Verknüpfung zwischen Arbeitsmarkt oder Finanzmarkt und Stoffströmen

Allerdings sind auch eine ganze Reihe an Nachteilen mit der Anwendung des Top-Down-Ansatzes verbunden:

- Die Bestimmung des Stofflagers ist aufgrund der in wesentlichen Punkten fehlenden Statistiken vor 1945 nicht möglich²⁹⁴.
- Die Gewinnung disaggregierter Informationen aus hoch aggregierten Statistiken über Verteilungsschlüssel oder andere Hilfsgrößen basiert auf vielen Annahmen und Schätzungen, die zu gravierenden Fehlern führen können²⁹⁵.
- Es besteht häufig kein Zusammenhang zwischen statistischen Kategorien und tatsächlich verwendeten Materialien oder durchgeführten Arbeitsgängen bei der Erstellung von Gebäuden²⁹⁶.
- Die aus der Abfallstatistik zu entnehmenden Daten besitzen eine sehr unbefriedigende Qualität, da sie weder den Wirtschaftssektor spezifizieren, aus dem der Abfall entstammt (vgl. oben angesprochene Problematik der statistischen Kategorie Gips) noch eine auch nur annähernde Konkretisierung der Zusammensetzung der allgemeinen Kategorie Bauschutt ermöglichen. Ferner werden in der Statistik auch alle diejenigen Stoffmengen nicht erfasst, die als Wirtschaftsgüter von den Baustellen zu anderen Einsatzorten gelangen.
- Top-Down-Ansätze können nur erste Ansätze zur Erstellung von Materialflussbilanzen liefern, da der Verbleib der Stoffe nicht dokumentiert ist. Hierzu sind ergänzende Plausibilitätsüberlegungen notwendig.

Gipsprodukten auch Gipsabfälle etwa aus der Anwendung von Modellformengips oder aus Industrien enthalten, in denen Gips als Nebenprodukt entsteht (z.B. Phosphorsäureherstellung, Citronensäureproduktion) zum anderen wird derjenige Teil, der aus dem Abgang von Gebäuden resultiert, summarisch unter Bauschutt erfasst. Verschnittreste beim Einbau der Produkte werden in der Regel unter Baustellenabfälle geführt.

²⁹⁴ Im Rahmen der ITAS/ifib-Studie wurde auch kein Versuch unternommen, mit Hilfe der Top-Down-Systematik eine Bestimmung des Stofflagers vorzunehmen.

²⁹⁵ Im Rahmen der ITAS/ifib-Studie war eines der Kernprobleme die Aufteilung der statistisch erfassten Stoffflüsse zwischen Hochbau und Tiefbau.

²⁹⁶ So gibt es beispielsweise keinen Zement in Gebäuden, sondern nur Beton, Mörtel etc. Die Verwendung der statistischen Kategorie Zement muss demnach konkreter hinterfragt werden.

4.3.2 Das Bottom-Up-Verfahren zur Quantifizierung von Stoffströmen und -lagern im Bauwesen

Die großen Unsicherheiten, die von der Verwendung der amtlichen Statistik ausgehen und die keine geeignete Grundlage für eine Detailplanung darstellen, sowie die fehlende Aussage des Top-Down-Ansatzes zur Höhe des Stofflagers, haben zur systematischen Erfassung und Klassifikation der bestehenden Bausubstanz nach verschiedenen Kriterien, der Ableitung und Detailspezifikation von typischen Modellvertretern dieser klassifizierten Substanzgruppen und anschließenden Hochrechnung von Flüssen und Lagern geführt. Zwei umfangreiche Ansätze zur Entwicklung eines Bottom-Up-Verfahrens liegen vor²⁹⁷.

Die Vorgehensweise beider Ansätze ist im Grundsatz identisch. Zunächst wird der gesamte bestehende Gebäudebestand in sogenannte Substanzgruppen eingeteilt. Zielsetzung der Kategorisierung ist es, den Bauwerken in Abhängigkeit von Nutzung und Entstehungszeit typische verwendete Baustoffe zuzuordnen und dabei systematisch andere Quellen wie etwa amtliche Statistiken über den Bauwerksbestand zu berücksichtigen.

²⁹⁷ Für die folgenden Ausführungen siehe ITAS/ifib (1998, S. 22-38) sowie Görg (1996, S. 77-108)

Kriterium		ITAS/ifib	Görg
Nutzungs- klasse	Wohn- gebäude	Einfamilienhäuser	Ein- und Zweifamilienhäuser
		Reihenhäuser	Mehrfamilienhäuser
		Kleine Mehrfamilienhäuser	
		Große Mehrfamilienhäuser	
		Hochhäuser	
	Nicht- Wohn- gebäude	Büro- und Verwaltungsgebäude	Büro-, Verwaltungs- und Geschäftshäuser
		Anstaltsgebäude	Gewerbe- u. Industriebauten
		Hotels und Gaststätten	Sonderbauwerke Hochbau
		Handels- und Lagergebäude	
		Fabrik- und Werkstattbauten	
		Landwirtschaftl. Gebäude	
		Sonstige	
Altersklasse ²⁹⁸		Vor 1870	Vor 1918
		1871-1918	
		1919-1948	1918-1945
		1949-1965	1946-1955
		1966-1978	1956-1970
		1979-1990	1971-1990
Bauart		Keine Aufgliederung nach Bauart ²⁹⁹	Massivbauart
			Fachwerkbau
			Skelettbauart
			Block-/Streifenbauart
			Plattenbau
			Fachwerkbauart
			Sonderformen

Tabelle 4.15: Typisierungsmerkmale des Gebäudebestands³⁰⁰

Für die sich aus dieser Kategorisierung ergebenden Substanzgruppen werden anschließend typische Gebäudevertreter ermittelt, die detailliert in ihrer Baustoffzusammensetzung untersucht werden und als „Platzhalter“ für die anschließende Multiplikation mit dem Bestand der jeweiligen Substanzgruppe dienen. Hierfür werden Messungen und Schätzungen der baustofflichen Zusammensetzung einzelner Typvertreter herangezogen. ITAS/ifib untersuchen dafür 160 Gebäude der verschiedenen Alters- und Nutzungsklassen und ermitteln die in diesen Gebäuden vorhandenen Bauteile und Bauelemente sowie die Massen der für die Erstellung der Bauteile erforderlichen Baustoffe.

Görg versucht, anhand von Informationen die Zusammenstellung von typischen Gebäudevertretern durchzuführen. Er bezieht sich auf Primärdaten (Planzeichnungen, vorhandene Gebäudebeschreibungen, Leistungsverzeichnisse, Gewerkeabrechnungen, Bauberichte, Berichte über durchgeführte Gebäudezerlegungen)³⁰¹. Da diese Primärdaten schon für Gebäude der Alterklasse vor 1985 deutliche Lücken aufweisen, werden auch Sekundärdaten

²⁹⁸ Beide Studien betonen, dass die Einteilung in Alterklassen sowohl nach bautechnisch relevanten Entwicklungen (historisch, architektonisch, technisch-konstruktiv) als auch nach der Einteilung der verfügbaren Statistik erfolgt.

²⁹⁹ ITAS/ifib (1998, S. 274) sprechen davon, dass in Zukunft weitere Differenzierungen insbesondere bei Nichtwohngebäuden vorzunehmen sind (hinsichtlich Bauart und technischer Ausrüstung).

³⁰⁰ In Anlehnung an ITAS/ifib (1998, S. 23-26), Görg (1996, S. 79). Görg zitiert zwar noch die Bauweise (Einzel-, Zeilen-, Block-, Komplexbebauung) als Differenzierungskriterium, verfolgt diese Einteilung aber selbst nicht weiter. Ihre Berücksichtigung dürfte keine grundsätzliche Veränderungen hervorrufen.

³⁰¹ vgl. hierzu Herrmann (1977), Rentz et al. (1994), Spengler (1994), Schultmann (1998)

(Informationen zu regionsspezifischen Besonderheiten der Baukonstruktion und der Gebäude, Unterlagen in Staatsarchiven, Kostenprüfberichte in Oberfinanzdirektionen) oder gar Tertiärdaten herangezogen (Zusammenstellungen von verwendeten typischen Baustoffen im Hochbau für bestimmte Alters- oder Nutzungsklassen³⁰² sowie Einschätzungen zum spezifischen Verhältnis eingesetzter Baustoffmassen oder -volumina pro m³ Bruttorauminhalt (BRI) oder m² Fläche³⁰³). Die Angaben für spezifische Werte zeigen ein im großen und ganzen konsistentes Bild: Zeidler nennt als Durchschnitt für Wohngebäude 0,334 m³/m³ BRI, Andrä et al. gehen für ein Wohngebäude mit 12 Wohneinheiten der 50er Jahre von 0,35 m³/m³ BRI aus; BBR nennt 1,70 m³/m² Wohnfläche für Einzelhäuser, 1,25 m³/m² Wohnfläche für Geschosswohnbauten, 1,0 m³/m² Nutzfläche für Büro- und Anstaltsgebäude sowie 0,8 m³/m² Nutzfläche für Betriebsgebäude; Kloft berechnet als Mittelwert aller Wohngebäude 0,528 t/m³ BRI entsprechend 2,55 t/m² Wohnfläche. Insgesamt erhält Görg auf diese Art 38 Modellgebäude für jede Substanzgruppe Nutzungsklasse/Altersklasse.

Grundlage der Bottom-Up-Verfahren ist jeweils eine umfangreiche Datenbank, in der alle gängigen Baustoffe gelistet sind. Ferner enthält die Datenbank Bauelemente und Bauteile, die in Gebäuden Verwendung finden³⁰⁴. So enthält z.B. das Bauelement 1 m² Decke in der Verwendung seit 1965 die Baustoffe Bodenbelage, Estrich, Trittschalldämmung, Betondecke und Gipsputz jeweils in einer bestimmten Rezeptur und Zusammensetzung. Durch die Beschreibung der Modellgebäude mit Hilfe der Bauelemente und der darin enthaltenen Baustoffe sowie der anschließenden Multiplikation der Anzahl der Vertreter jeder Substanzgruppe mit diesen Werten lässt sich der Bestand im Stofflager schätzen³⁰⁵.

Werden die Basisdaten des Modells (Baustoffliste, Bauelementliste, Liste typischer Gebäudevertreter) jetzt mit Lebenszyklusannahmen der Gebäude sowie daraus resultierender Nachfrageströme verknüpft³⁰⁶, können das dynamische Verhalten des Stofflagers sowie die Input- und Outputströme beschrieben werden. Den Gebäuden werden in Abhängigkeit von Nutzung und Alter jeweils zeitlich unterschiedliche Erneuerungszyklen (Renovierung, Modernisierung, Sanierung) zugewiesen: im Durchschnitt 45 Jahre für ein Mehrfamilienhaus der Altersklasse 1871-1918 und im Durchschnitt 23 Jahre für ein Mehrfamilienhaus der Altersklasse 1966-1978³⁰⁷. Die Erneuerungszyklen weisen unterschiedliche Material- und Stoffströme auf: bei einer Modernisierung scheinen hauptsächlich nichttragende Bauteile als Input und Output, von Sanierungsmaßnahmen sind auch tragende Elemente betroffen.

Im Ergebnis kommt der Bottom-Up-Ansatz von ITAS/ifib zu einem Inputstrom in den Hochbaubereich von 142 Mio. t im Jahr 1991 sowie einem Outputstrom von 68,6 Mio. t. Vom Outputstrom entfallen 31 Mio. t auf Erneuerungsmaßnahmen und 25,5 Mio. t auf Abrissmaßnahmen. Für die nicht weiter differenzierte Stoffgruppe Kalk/Gips/Mörtel wird ein Zugang von ca. 16 Mio. t, verteilt auf 7 Mio. t für den Neubau von Gebäuden sowie 9 Mio. t für Erneuerungsmaßnahmen. Der Abfallstrom der Stoffgruppe Kalk/Gips/Mörtel wird mit insgesamt 13

³⁰² vgl. Zöpel (1987), Ahnert (1985), Andrä et al. (1994, S. 5-40)

³⁰³ Angaben zu spezifischen Baustoffzusammensetzungen von Gebäuden finden sich etwa bei Herrmann (1977), Andrä et al. (1994, S. 108), Rentz et al. (1994), Nicolai (1995, S. 30), Zeidler (1982), Kloft (1997, S. IX-2), BBR (1998, S. 16)

³⁰⁴ Zu einer beispielhaften Auflistung von Bauteilen und Bauelementen vgl. Tabelle 4.13

³⁰⁵ Statt der Anzahl der Vertreter je Substanzgruppe verwenden ITAS/ifib als Bezugsgröße die Nutzfläche der Gebäude (ITAS/ifib, 1998, S. 27)

³⁰⁶ vgl. Kapitel 4.2.2.1

³⁰⁷ vgl. Ebel et al. (1996, S.5 ff.) Die Verteilung dieser Erneuerungszyklen wird im Modell probabilistisch um einen mittleren Wert herum abgebildet. Vor dem endgültigen Gebäudeabgang wird noch ein Zwischenstadium „Brache“ eingeführt, die Verweilzeit in diesem Zustand der Nichtnutzung, aber gleichzeitigen stofflichen Präsenz in der Technosphäre wird mit 10-30 Jahren angenommen.

Mio. t angenommen, wobei 11 Mio. t auf Erneuerungsmaßnahmen und 2 Mio. t auf Abrisse zurückzuführen sind.

Die Vorteile des Bottom-Up-Ansatzes können wie folgt zusammengefasst werden:

- Möglichkeit zur Schätzung des Stofflagers sowie insbesondere des im Top-Down-Ansatz sehr unbefriedigenden Abfallstroms in seiner Zusammensetzung.
- Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Bestands auch auf der Ebene der Baustoffe.
- Möglichkeit der Erstellung von Zukunftsprognosen anhand der Struktur des Modells, das mehrere erklärende Variable beinhaltet (z.B. Erneuerungszyklen, Veränderung der technischen oder funktionalen Lebensdauer), und Ableitung von Strategien aus den Erkenntnissen.

Auch die Nachteile aus der Anwendung des Bottom-Up-Verfahrens sind evident:

- Es handelt sich um einen sehr komplexen und umfangreichen Ansatz, der ständig weiterentwickelt werden muss.
- Die Abhängigkeit der Berechnungen von den gewählten typischen Gebäudevertretern in den Substanzklassen ist erheblich³⁰⁸.
- Das Modell basiert grundsätzlich auf einer Reihe von Annahmen, die zwar teilweise operationalisiert sind, aber insgesamt ein hohes Unsicherheitspotenzial bergen.
- Das Modell hat praktisch keine direkten Berührungspunkte zur Realität wie etwa die Aufnahme und Verarbeitung der jährlichen Inputströme aus den statistischen Erhebungen, sondern generiert seine Dynamik ausschließlich aus den formulierten Prämissen.

4.3.3 Erweiterung der Mengenbetrachtungen um eine systemtechnische Analyse

Die Komplexität sowohl hinsichtlich der Mengen als auch hinsichtlich der Zusammensetzung kann durch eine umfangreiche ökologische Bewertung von Gütern und einer damit zusammenhängenden Analyse der Stoffflüsse ergänzt werden. Hierin enthalten sind Analysen und Bewertungen der Austauschprozesse mit der Natur über den gesamten relevanten Zeitraum von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung einzelner Baumaterialien, sowie die Errichtung, Nutzung und Instandhaltung bis hin zur Entsorgung oder Rezyklierung.

Ziel der nachfolgend skizzierten Stoffflussanalyse nach Brunner³⁰⁹ ist es, aus den Kenntnissen über die stoffliche Zusammensetzung von Abfallströmen Verknüpfungen zu Stoffflüssen und Stofflagern in den Systemen Abfallwirtschaft, gesamtes technosphärisches Lager und Anthroposphäre herzuleiten. Die Abfallwirtschaft ist konzeptionell bereits am weitesten entwickelt³¹⁰, so dass in ihr am unmittelbarsten die Effekte von Maßnahmen abgelesen werden können.

Am Beispiel des Bausektors wird nachfolgend skizziert, wie die Beurteilung des Erfolges abfallwirtschaftlicher Maßnahmen im Hinblick auf die Erfüllung umweltschutzwirksamer Vorga-

³⁰⁸ ITAS/ifib gehen davon aus, dass der im Bottom-Up-Modell ermittelte Inputstrom von 142 Mio. t zu niedrig sein dürfte, da die Auswahl der Gebäude noch nicht exakt genug und die Liste der Bauelemente noch nicht komplett sei. (1998, S. 231)

³⁰⁹ vgl. Brunner/Stämpfli (1993, S. 27-48)

³¹⁰ vgl. Kapitel 2.2.5

ben erfolgt. Dazu wird eine Gegenüberstellung mit anderen anthropogenen Prozessen auf vier Ebenen vorgenommen:

1. Bestandsaufnahme der Behandlung von Baurestmassen
2. Vergleich der Baurestmassen mit anderen Stoffen in der Abfallwirtschaft
3. Vergleich der Baurestmassen mit anderen Prozessen der Bauwirtschaft
4. Vergleich der Baurestmassen mit sonstigen anthropogenen Prozessen

Die Analyse erfolgt mit Hilfe einer Güterbilanzierung in einem räumlichen begrenzten Untersuchungsraum mit definiertem Zeitbezug, bei der durch die Betrachtung der einzelnen Güter, die einen Stoff im nennenswerten Umfang enthalten, die stofflichen und physikalischen Zusammensetzungen sowie die Verteilung des Baustoffes abgeschätzt werden. Insbesondere wird der Weg des Stoffes in der Abfallwirtschaft abgeschätzt, um somit feststellen zu können, in welchen Prozessen der Abfallwirtschaft sich kritische Anreicherungen ergeben.

Diese systemtechnische Erweiterung bringt folgende Vorteile:

- Berechnungen sowohl aus dem Top-Down- als auch aus dem Bottom-Up-Ansatz, werden gegenseitig verifiziert
- Kritische Pfade wie Anreicherungen in bestimmten Medien, Ungleichgewichte in den Flüssen und Lagern, Direktverknüpfungen zwischen Quellen und Senken etc. werden transparent gemacht
- Ableitungen der Bedeutung des Stoffstroms im Verhältnis zu anderen Stoffstroms sind möglich
- Aufgrund der Verifizierung der Zahlenangaben sowie der systemtechnischen Dynamik lassen sich auch Validierungen der Lebensdauerannahmen anstellen.

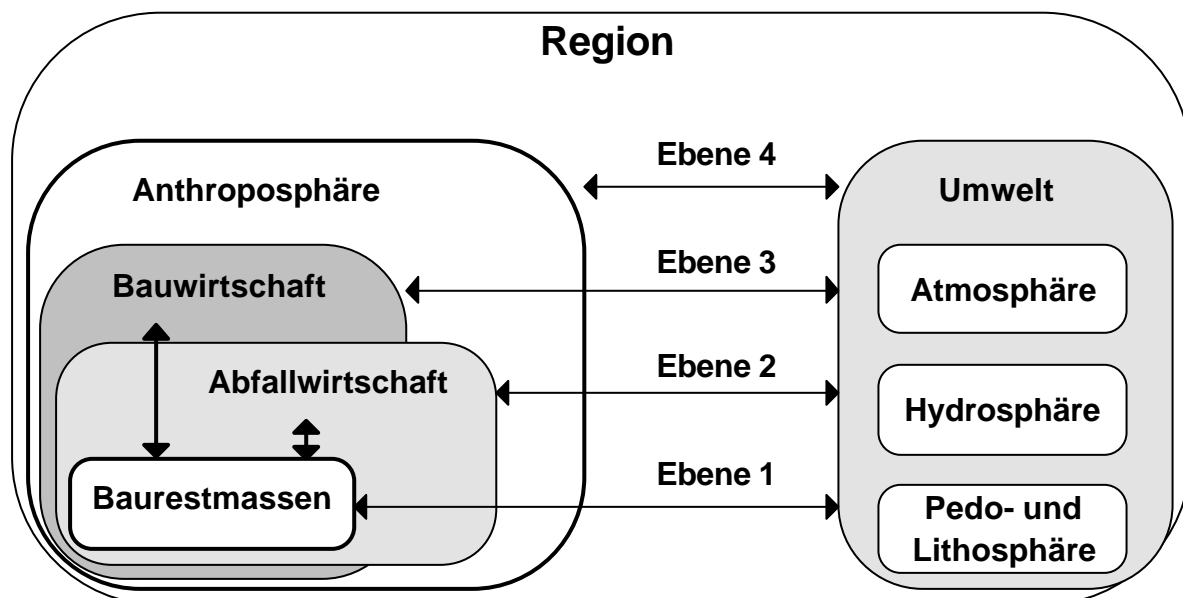


Abbildung 4.4: Einbettung von Baurestmassen in die Anthroposphäre und Verknüpfung mit der Umwelt

Am Beispiel von Gips und Schwefel in Oberösterreich wird in Kapitel 5.2.4 bzw. 5.2.5 exemplarisch dargestellt, wie eine derartige Güter- und Stoffbilanzierung erfolgt und welche Aussagen mit dieser Darstellung der Beziehungen zwischen einzelnen Systemebenen möglich sind³¹¹.

4.4 Zusammenfassung der Modellbildung

Zusammenfassend werden nachfolgend die wesentlichen Aussagen der Modellbildung zusammengestellt:

1. Quantitative Beschreibungsmaße zur Charakterisierung der Verteilung von Stoffen in Gemischen stellen sich in komplexen Systemen wie dem Baubereich als nicht zielführend heraus. Statt dessen wird ein auf einem Scoring-Ansatz basierendes Bewertungsverfahren herangezogen, das die verschiedenen Betrachtungsdimensionen integriert und anhand von Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Der so ermittelte Dispersionsgrad ist eine dimensionslose Größe, mit der Art und Ausmaß der Verteilung eines Stoffes in einem zu untersuchenden Gebiet im Hinblick auf seine Eignung zur Kreislaufführung beschrieben werden kann. Er muss sowohl die Produktion als auch die Reduktion integrieren und dem sozialwissenschaftlichen Charakter von Stoffstrommanagement gerecht werden.
2. Der Dispersionsgrad wird auf der Ebene der Produkte ermittelt, in die ein Stoff Eingang gefunden hat, da die Kriterien zur Ermittlung des Dispersionsgrads bei diesen Produkten sehr unterschiedlich sein können. Somit ist es möglich, die Komplexität des Gesamtsystems zu beschreiben und letztendlich die Dispersion eines Stoffes gesamtheitlich zu beschreiben.
3. Stoffe im Bauwesen besitzen eine extrem lange Verweilzeit im anthropogenen Lager. Diese Verweilzeit ist wiederum von einer Reihe von Faktoren abhängig, so dem Produkt, in das der Stoff eingebunden ist, von der Art der Nutzung des Produkts sowie aktuellen Trends (funktionale Lebensdauer vs. technische Lebensdauer). Für jedes Produkt, in das ein Stoff Eingang gefunden hat, müssen Parameter für die durchschnittliche Lebensdauer dieses Produkts sowie die Varianz um diese durchschnittliche Lebensdauer geschätzt werden.
4. Es zeigt sich, dass in den nächsten 50 Jahren mit einer deutlichen Zunahme der Abfallmengen zu rechnen ist. Gleichzeitig wirken durch die lange Verweilzeit Maßnahmen auf der Inputseite erst mit einer sehr langen Verzögerung. Hier muss sehr deutlich der gesamtwirtschaftliche Nutzen derartiger Maßnahmen herausgestellt werden, auch wenn der Effekt nicht unmittelbar sichtbar ist.
5. Angesichts der hohen Unsicherheiten über die tatsächlichen Ströme und Lager im Bauwesen haben sowohl der Top-Down- als auch der Bottom-Up-Ansatz ihre Berechtigung. Es ist sogar erforderlich, sich zur Annäherung an die Realität beider Ansätze zu bedienen und damit eine Abschätzung der tatsächlichen Situation zu versuchen.
6. Zumindest im Bereich des Inputs kann davon ausgegangen werden, dass der Top-Down-Ansatz eine obere Schranke für den realen Wert darstellt, da Unsicherheiten in den Annahmen über die letztendlichen Verwendungsbereiche bestehen. Der Bottom-Up-Ansatz stellt eine untere Schranke für die tatsächlichen Inputströme dar. Bezogen auf die Input-

³¹¹ vgl. Kapitel 5

ströme besitzt der Top-Down-Ansatz eindeutig Vorteile und eine höhere Aussagekraft, wenn die Zahl der Annahmen über die Verwendungsbereiche klein gehalten werden kann und mit geringen Unsicherheiten behaftet ist.

7. Die Erfassung des Lagerbestands sowie seine stoffliche Zusammensetzung ist im wesentlichen nur aufgrund des Bottom-Up-Ansatzes möglich, da im Top-Down-Ansatz statistische Daten vor 1945 praktisch fehlen und die Zahl der zu treffenden Annahmen sehr groß und mit Risiken behaftet wäre.
8. Hinsichtlich des Abgangs kann nur der Bottom-Up-Ansatz ein teilweise befriedigendes Bild zeichnen. Während dieser durch die Annahme von Erneuerungszyklen und Abrissraten eine obere Schranke für den Wert des tatsächlichen Abgangs liefert (vermutlich ist die tatsächliche Umbau- und Abrissbereitschaft geringer als im Modell angenommen), ist die statistische Aussage nicht auf die Zusammensetzung des Bauschutts bezogen und dürfte wesentlich zu niedrig liegen, da angenommen werden muss, dass es eine Reihe von bislang statistisch nicht erfassten Entsorgungswegen gibt³¹².
9. Die Ermittlung der Mengengrößen von Stoffströmen und Stofflagern kann durch die systemtechnische Betrachtungsweise nach Brunner wirksam unterstützt werden, da sowohl Top-Down- und Bottom-Up-Schätzungen als auch Hypothesen über Lebensdauern verifiziert werden können.
10. Die durch die systemtechnische Betrachtung ableitbaren Ergebnisse zeigen auf, an welchen Stellen das System nicht im Gleichgewicht ist, wo sich systematisch Puffer und Lager bilden, welchen Stellenwert der Stoffstrom im Verhältnis zu anderen anthropogenen Stoffströmen besitzt, welcher Anteil des Stoffstroms nicht im Kreislauf geführt wird und ggf. sogar diffus verloren geht und welche „letzte Senke“ für einen Stoffstrom geeignet ist.

³¹² vgl. hierzu Glenck et al (1996, S. 132). Sie gehen davon aus, dass über 60 % der Bauabfälle auf einem Entsorgungspfad der „unbekannten Verwertung und Entsorgung“ verschwinden. Hierunter werden wilde Ablagerungen, Mülldeponien, Wiederverfüllung von Kies- und Schottergruben, fehlende oder falsche Deklaration bei Deponien, bautechnische Wiederverwertung oder Export zusammengefasst.

5. ANWENDUNG DES MODELLS AUF DEN STOFFSTROM GIPS

Das im vorangegangenen Kapitel aufgestellte Modell zur qualitativ-quantitativen Beschreibung von Stofflagern und Stoffströmen eignet sich insbesondere für Stoffe mit einer langen Verweilzeit im technosphärischen Puffer und einem niedrigen spezifischen Wert, bei denen keine unmittelbare zeitliche Verknüpfung zwischen Produktion und Reduktion vorliegt. Im folgenden soll das Modell auf den Stoffstrom von Gips angewendet werden, da sich das Modell hierfür, wie auf eigentlich alle mineralischen Baustoffe sowie andere nicht abbaubare Baustoffe wie Holz und Kunststoffe, besonders gut eignet. Insbesondere legen die großen Massen und der starke regionale Bezug der Stoffe sowohl in der Produktion als auch in der Reduktion eine Untersuchung von Baustoffen nahe. Für Gips als Anwendungsbeispiel spricht, dass es eine überschaubare Anzahl von Gütern und Produkten gibt, in denen Gips enthalten ist, weswegen eine zu große Komplexität vermieden werden kann bei gleichzeitiger umfassender Abbildung der Realität. Ferner ist dieser Stoffstrom bislang noch wenig im öffentlichen Bewusstsein verankert, obwohl seit etwa 1985 die in den Baubereich eingebrachten Mengen stark ansteigen.

Das nachfolgende Kapitel ist wie folgt aufgebaut: Zunächst wird eine Einführung in den Baustoff Gips gegeben, beginnend von seiner historischen Verwendung über Vorkommen und Entstehung von Gips, seine Verwendung in der Technosphäre und bisherige Ansätze zur Entsorgung. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die Parameter des Modells aus Kapitel 4 für Gips ermittelt, von den auf Produktbasis bestimmten Dispersionsgraden über die kohortenanalytische Darstellung der Verweilzeit bis hin zu Gipsmengen in den Lagern und Stoffströmen einschließlich einer systemtechnischen Betrachtung der regionalen Bedeutung von Gips als überragendem Schwefelträger. Das Kapitel endet mit einer graphischen Darstellung der Modellergebnisse und einer Diskussion über Aussagen aus dem Modellverlauf.

5.1 Der Baustoff Gips

Gips ist schwefelsaures Calcium, welches in Form des Calciumsulfat-Dihydrats ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) in der Natur als Mineral vorkommt und außerdem bei chemischen Prozessen (Rauchgasentschwefelung, Herstellung von Phosphorsäure) als Nebenprodukt anfällt. Seine alte griechische Bezeichnung lautet gypsos, ein Hinweis darauf, dass schon in antiker Zeit Gips ein wertvoller Baustoff war.

5.1.1 Vorkommen von Gips³¹³

5.1.1.1 NATÜRLICHER GIPS

Gips kommt in der Natur in zwei Verbindungen vor:

$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$: Calciumsulfat-Dihydrat, genannt Gips

CaSO_4 , Calciumsulfat, wasserfrei, genannt Anhydrit

Calcium-Ionen und Schwefel in Form von Sulfat bilden, wenn sie zusammen vorkommen, eine relativ wenig wasserlösliche, salzartige, neutrale Verbindung, die als Gips oder Anhydrit

³¹³ Zu den folgenden Darstellungen vgl. z.B. Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie; Winnacker/Küchler: Chemische Technologie (1983). Ähnliche Darstellungen lassen sich in allen Standard-Lehrbüchern der anorganischen Chemie finden.

bekannt ist. Chemisch gesehen sind sowohl Gips als auch Anhydrit das Salz einer starken Säure und einer starken Base, weswegen wässrige Lösungen von Gips neutral reagieren (pH-Wert um 6,7). Sind Calcium-Ionen und Sulfat-Ionen gemeinsam in Wasser gelöst, so kristallisiert diese Verbindung bei Übersättigung aus. Bei Temperaturen unter 40°C scheidet sich dabei Gips ab; seine Löslichkeit in Wasser bei pH 7 und 20°C beträgt 2,1 g/l; über 40°C scheidet sich Anhydrit aus, dessen Löslichkeit in Wasser 2,7 g/l beträgt. Anhydrit entsteht auch, wenn NaCl und besonders MgCl_2 in bestimmter Konzentration vorliegen. Unter natürlichen Bedingungen wird eine Übersättigung durch die Verdunstung von Meerwasser erreicht oder kann künstlich herbeigeführt werden, wenn calciumhaltige Lösungen mit Sulfat-Ionen oder sulfathaltige Lösungen mit Calcium-Ionen versetzt werden. Von der künstlichen Möglichkeit der Umkristallisation oder der doppelten Umsetzung macht die Technik in zahlreichen Prozessen Gebrauch, etwa bei der Rauchgasentschwefelung, bei der Herstellung von Phosphorsäure oder bei der Herstellung reiner Säuren (Weinsäure, Citronensäure). Die folgende Gleichung beschreibt das Verhältnis des Systems Gips – Anhydrit:



Bei der Gipsbildung aus Anhydrit erfolgt eine starke Volumenzunahme von 60%! Hieraus erklärt sich auch die Druckabhängigkeit der Reaktion. Die Hydratbildung wird trotz der Verfügbarkeit von Wasser bei genügender Überdeckung unterdrückt. Aus Gips kann sich aber bei Anwesenheit von Verunreinigungen bei Umgebungstemperaturen und unter leicht erhöhtem Druck auch wieder Anhydrit und Wasser bilden. Für sehr große Monodeponien von Gips in der Zukunft muss diese Möglichkeit berücksichtigt und noch genauer untersucht werden, da die bisherigen Daten diese Rückreaktion nicht mit Sicherheit ausschließen.

Beim Erwärmen unter Atmosphärendruck verliert Gips sein Kristallwasser. Bei Temperaturen von 120 -140 °C bildet sich aus Gips das Halbhydrat, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, das auch als seltenes Mineral unter dem Namen Bassanit bekannt ist. Das Halbhydrat nimmt wieder Wasser unter Verfestigung auf und wird aus diesem Grunde für viele Zwecke als Modell- oder Stuckgips verwendet. Gips, der bei 1300°C gebrannt wurde, wird in großem Umfang als Mörtel- und Estrichgips eingesetzt.

Naturgips und Naturanhydrit sind auf der Erdoberfläche weit verbreitet und kommen als Felsgestein in zahlreichen großen Lagerstätten von vielen Millionen Tonnen vor, wobei sie andere Gesteinsformationen in weißen Schichten und Adern durchziehen. Sie sind durch Auskristallisieren beim allmählichen Eintrocknen von Meerwasserbecken entstanden. Unten finden sich die am schwersten löslichen Carbonate Kalkstein und Dolomit, darüber folgen die Sulfate Gips und Anhydrit, die ihrerseits von den leichter löslichen Chloriden (Kalisalz, Steinsalz) überlagert werden. Die ältesten Vorkommen sind die des Zechstein mit einem Alter von rund 240 Millionen Jahren. Die Gipse des Muschelkalkes sind etwa 215 Millionen Jahre alt, die des Keuper rund 200 Millionen Jahre.

Der Gips entstand dabei als relativ reine Verbindung mit einem Reinheitsgrad über 95%. Diese primären Gipslagerstätten sind jedoch sehr selten, sie sind zum Beispiel im Miocän des Mittelmeergebiets zu finden. Durch zunehmenden Druck und höhere Temperaturen entstand aus den meisten primären Gipslagerstätten Anhydrit durch Ausscheidung des Wassers. Nahe der Erdoberfläche wurde der Anhydrit an vielen Stellen durch Oberflächen- und Grundwasser wieder in Gips zurück verwandelt (sekundäre Gipslagerstätten). Durch Auslaugung mit Wasser enthält Gips in der Regel keine leichtlöslichen Salze mehr. Gefügebau

und Farbe von Gipsstein und Anhydrit können sehr verschieden sein: felsig (Felsengips), körnig (Alabaster), faserig (Fasergips) und spätig-blättrig-durchsichtig (Marienglas).

Gipshaltige Böden und Gipslagerstätten haben Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Grundwassers. Die großen, leicht zugänglichen Lagerstätten von Gips und Anhydrit liegen im Harzvorland (südliches Niedersachsen, Nordhessen, Thüringen, Sachsen-Anhalt), Mittel- und Unterfranken, auf der Schwäbischen Alb sowie im Saarland. Hier findet sich häufig eine bleibende Härte des Wassers, die als Sulfathärte bezeichnet wird.

			Franken	Ruhrgebiet
Kationen	Calcium	Ca^{2+}	192,0	38,0
	Natrium	Na^+	54,9	21,9
	Magnesium	Mg^{2+}	41,2	6,6
	Kalium	K^+	4,3	3,5
Anionen	Sulfat	SO_4^{2-}	243,0	46,5
	Chlorid	Cl^-	107,0	21,7
	Nitrat	NO_3^-	33,9	10,3
	Hydrogencarbonat	HCO_3^-	12,2	4,2
Härte	Gesamthärte		32,0 d°	7,0 d°
	Sulfathärte (permanent)		15,8 d°	1,4 d°
	Carbonathärte (temporär)		16,2 d°	5,6 d°
pH-Wert			7,8	7,7

Tabelle 5.1: Zusammensetzung des Trinkwassers im Raum Franken und im Ruhrgebiet (Angaben in mg/kg Wasser)³¹⁴

Die natürlichen weltweiten Gipsvorkommen betragen nach konservativen Schätzungen weltweit etwa 2,3 Mrd. t, davon rund 800 Mio. t in Europa, 700 Mio. t in den USA, 400 Mio. t in Kanada sowie 70 Mio. t in Mexiko. Die geschätzte weltweite Produktionsmenge liegt zwischen 1990 und 1996 bei knapp unter 100 Mio. t (1992: 98,8 Mio. t, 1996: 99,7 Mio. t)³¹⁵. Legt man die konservativ geschätzten Gipsvorräte und die eine durchschnittliche Jahresproduktion von ca. 100 Mio. t zu Grunde, so ergibt sich heraus lediglich ein natürlicher Gipsvorrat für etwa 25 Jahren. Trotz der potenziell möglichen weiteren Erschließung abbauwürdiger Gipsvorkommen (insbesondere durch Nutzung von Anhydrit) und einer wahrscheinlichen Verbesserung der Fördertechnologie ist aufgrund der vorherrschenden Knappheitsverhältnisse eine Erhöhung der Preise für Naturgips in Zukunft wahrscheinlich. Des weiteren kann davon ausgegangen werden, dass der Rohstoff Naturgips zukünftig verstärkt in Gebieten mit hohem Naturschutzwert abgebaut wird³¹⁶.

In Deutschland werden jährlich etwa 3,5 Mio. t Naturgips verbraucht, wovon etwa 2,5 Mio. t – 3 Mio. t in Deutschland abgebaut werden. Der Anteil von importiertem Gips, meist aus Spanien, ist mit bis zu 1 Mio. t pro Jahr sehr hoch. Dies könnte auf einen preisgünstigeren Abbau im Ausland sowie auf eine zunehmende Verknappung in den deutschen Gipslagerstätten in Verbindung mit restriktiveren Abbaugenehmigungen zurückzuführen sein.

³¹⁴ Wirsching (1985, S. 139)

³¹⁵ American Ceramic Society Bulletin (Heft 6/93, S. 100). Ebenfalls Industrial Minerals (1998, S. 27) sowie Roskill (1997)

³¹⁶ Haug (1994, S. 312). Ein ähnliches Ergebnis wird in NLFÖ (1998, S. 37) vorhergesagt, hier lautet die Prognose auf etwa 30 bis 40 Jahre. Die Annahme über die Reichweite der Ressource Naturgips ist auch ein entscheidender Parameter bei der Prognose der zukünftigen Entwicklung des Stoffstroms in Kapitel 6.

5.1.1.2 TECHNISCHER GIPS

Seit etwa Mitte der 80er Jahre kommen zu diesen natürlichen Gipsvorkommen neuartige Quellen für Gips aus der Rauchgasentschwefelung von Kraftwerken hinzu. Zunächst fielen diese neuen Gipsquellen in Deutschland sowie einigen europäischen Ländern, etwa in Skandinavien, an, erst in jüngster Zeit kommen durch gesetzliche Vorgaben in Ländern der Europäischen Union und Nordamerika langsam zusätzliche Gipsströme hinzu. Der Anfall aus dieser Quelle erfuhr in Deutschland einen sprunghaften Anstieg von rund 0,25 Mio. t 1985 über etwa 3,5 Mio. t 1991 (2,27 Mio. t aus Steinkohle, 1,27 Mio. t aus Braunkohle) auf rund 5 Mio. t im Jahr 1996 (2,37 Mio. t aus Steinkohle, 2,6 Mio. t aus Braunkohle)³¹⁷. Für das Jahr 2000 wird wegen der weiteren Entschwefelung von ostdeutschen Braunkohlekraftwerke mit einem gesamten REA-Gipsaufkommen in Deutschland von 6,3 Mio. t gerechnet (2,3 Mio. t aus Steinkohle, 4 Mio. t aus Braunkohle)³¹⁸, woraus sich abzüglich der freien Feuchte von 10 % ein Anfall von etwa 5,7 Mio. t REA-Gips ergibt.

In technischen Prozessen wird die Eigenschaft der doppelten Umsetzung insbesondere zur Rauchgaswäsche bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen eingesetzt. Diese Brennstoffe (Steinkohle, Braunkohle, Torf, Erdöl, Erdgas) enthalten neben Kohlenstoff und Wasserstoff geringere Mengen Schwefel, der entweder organischer (aus den Eiweißstoffen der organischen Masse stammend) oder anorganischer Natur ist (Pyrit). Dieser Schwefel befindet sich bei der Verbrennung im Rauchgas als gasförmiges SO_2 .

Zur Erfüllung der 13. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz müssen seit 1988 alle Kohle- und Ölkraftwerke mit einer thermischen Leistung von über 300 MW die SO_2 -Emissionen auf 400 mg/m³ begrenzen. Kleinere Anlagen mit einer thermischen Leistung über 50 MW sowie Kraftwerke in den Neuen Bundesländern folgten später (1995, für Kraftwerke in den Neuen Bundesländern gelten Übergangsregelungen bis 2000). Die technische Realisierung zur Erfüllung dieser Auflage erfolgt in Abhängigkeit von der Größe des Kraftwerks. Dabei werden in Deutschland etwa 95 % der installierten Kraftwerksleistung nach dem Kalksuspensionsverfahren (Nasswäsche) entschwefelt, die restlichen 5 % von kleineren Kraftwerken mit Leistungen zwischen 50 und 150 MW werden nach dem Sprühabsorptionsverfahren entschwefelt.

Bei der Nasswäsche wird die Rauchgasentschwefelung mit wässrigen, schwach basisch reagierenden Suspensionen von feingemahlenem, natürlichem Kalkstein (CaCO_3) durchgeführt. Die zunächst mit Wasser vorgereinigten Rauchgase werden in einem Absorber im Gegenstromverfahren mit einer feinen Kalksteinsuspension besprüht, das mit Schwefeldioxid zu Calciumsulfit reagiert und schließlich mit Sauerstoff zu Gips oxidiert. Die abgeführte Gips-suspension wird durch Eindicken und Zentrifugen entwässert, so dass ein feinteiliger Gips mit einer Restfeuchte von 10 % entsteht. Die anfallende Menge an Gips hängt dabei wesentlich vom Schwefelgehalt der Kohle und vom Entschwefelungsgrad der Anlage ab. Bei einem Entschwefelungsgrad von 95 % und einem Schwefelgehalt der Kohle von 1 Massen-% entstehen aus 100 t Kohle etwa 5,4 t Gips, wozu 3,2 t Kalkstein erforderlich sind³¹⁹.

Der wesentliche Unterschied zwischen Rauchgasgips und Naturgips ist technologischer Art: Rauchgasgips fällt als feinteiliges Pulver mit 10 % Feuchtigkeit an, Naturgips liegt als trockenes Felsgestein vor, das nach Zerkleinerung eine Korngröße von bis zu 50 mm besitzt. Es ist

³¹⁷ vgl. Puch/vom Berg (1997, S. 608) sowie Abbildung 2.4

³¹⁸ vgl. Haug (1994, S. 311)

³¹⁹ Zur Verfahrensbeschreibung der Rauchgaswäsche und den REA-Gips-Mengen vgl. Mallon (1998, S. 222)

daher erforderlich, den REA-Gips zunächst zu trocknen und zu brikettieren. Hierzu sind zusätzliche Aufwendungen von ca. 150 kWh/t REA-Gips zur Trocknung sowie 10 kWh/t REA-Gips zur Brikettierung erforderlich³²⁰. Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung besteht zwischen REA-Gips und Naturgips kein großer Unterschied, der Gehalt an Spurenelementen variiert jedoch. So sind insbesondere die Werte an Quecksilber und Selen im REA-Gips gegenüber dem Naturgips deutlich erhöht.

	Gehalt im Naturgips (mg/kg)	Gehalt im REA-Gips (mg/kg)	Erdkruste (mg/kg) ³²¹
Arsen	0,22 - 4	0,21-3	1-20
Blei	0,5-21	0,3-22	0,1-20
Cadmium	0,03-0,30	0,003-0,29	0,1-1
Chrom	0,65-25	1-35	2-100
Kupfer	5-14	2-9	1-55
Nickel	0,3-13	0,3-13	2-75
Quecksilber	0,006-0,005	0,3-1,3	0,08-1
Selen	<0,5	2-16	0,05-1
Vanadium	<26	<8	<135
Zink	13-40	5-50	10-70

Tabelle 5.2: Typische Spurenelementkonzentrationen von Naturgips und REA-Gips³²²

Hinsichtlich des rechtlichen Status ist es gelungen, REA-Gips dem Naturgips im Sinne des KrW-/AbfG gleichzustellen. In der strengen Auslegung des Abfallbegriffs aus § 3 Abs. 3 fällt REA-Gips bei der Energieumwandlung an, ohne dass der Zweck der Handlung hierauf gerichtet sei. In einem Rechtsgutachten wird jedoch festgestellt, dass das Produkt REA-Gips im Rahmen der Energieerzeugung zweckgerichtet hergestellt wird. Ferner fällt es aus dem Anwendungsbereich des europäischen Abfallrechts heraus, da es aufgrund seiner Eigenschaften keine Umwelt- oder Gesundheitsbeeinträchtigungen erwarten lässt. § 3 Abs. 1 KrW-/AbfG hebt aber explizit auf den europäischen Abfallbegriff ab³²³. Zwischen dem Bundesumweltministerium und der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) gibt es ein Konsenspapier, das den Produktstatus von REA-Gips bestätigt³²⁴.

Neben dem REA-Gips fällt technischer Gips noch bei weiteren technischen Prozessen an:

- Gips aus der Phosphorsäureherstellung aus Phosphaterzen und Schwefelsäure (Phosphorgips). In Deutschland wurde zuletzt im Jahr 1990 311.000 t Phosphorgips hergestellt, der als Sonderabfall entsorgt werden musste. In den Niederlanden, Frankreich und den USA fällt jedoch weiterhin Phosphorgips an, der dort entweder zunächst auf Deponien 30-50 Jahre zwischengelagert wird, bis er endgültig entsorgt werden kann³²⁵, oder aber bis vor kurzem noch in Weltmeere verklappt wurde. Der weltweite Anfall an Phosphorgips ist wegen der Nachfrage an phosphathaltigen Düngemitteln beträchtlich (ca. 130 Mio. t im Jahr 1985). Vor allem wegen der sauren Bestandteile ist bei Festlanddepo-

³²⁰ vgl. Hamm (1991, S. 601)

³²¹ Vergleichsdaten aus Schachermayer et al. (1995, S. 32) sowie Beckert (1991, S. 51)

³²² Daten aus Beckert/Einbrodt (1991, S. 50 f.), Schachermayer et al. (1995, S. 34), Kahl (1993, S. 100)

³²³ vgl. Baumann (1996)

³²⁴ Schriftliche Auskunft Dr. Kersten 01.11.99

³²⁵ Auch in Deutschland findet sich in Emsbüren noch eine große Phosphorgipsdeponie, die erst im Jahr 2020 vollständig verarbeitet sein wird. Zu Kosten und Schwierigkeiten mit derartigen Deponien vgl. Leyshon (1996, S. 34 ff.)

nien besondere Umsicht erforderlich, damit das empfindliche pH-System nicht gestört wird.

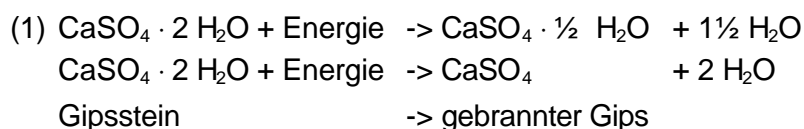
- Fluoroanhydrit, der bei der Flusssäureherstellung durch Reaktion von Flussspat mit konzentrierter Schwefelsäure als poröses, trockenes Produkt entsteht. Er fällt in einer Menge von jährlich etwa 300.000 t in Deutschland an und wird hauptsächlich in der Zementindustrie und in der Bauindustrie als Anhydritestrich verwendet.
- Sonstige technische Calciumsulfate aus der Produktion von Weinsäure, Citronensäure, Oxalsäure und Borsäure. Der Anfall aus diesen Prozessen beträgt in Deutschland rund 50.000 t pro Jahr, z.T. wird er wegen seines außerordentlich hohen Weißgrads als Dentalgips eingesetzt (z.B. Citronensäuregips). Für die Aufbereitung des Citronensäuregipses zu Stuckgips ist ein Aufwand von etwa 27 kWh/t für die Vorbehandlung sowie 65 kWh/t für die Calcinierung erforderlich, er liegt damit nur etwas mehr als halb so hoch wie beim REA-Gips³²⁶.

5.1.2 Verwendung von Gips

Als erste entdeckten die ägyptischen Pharaonen vor etwa 5000 Jahren, dass Gipsstein zu einem feinen Pulver zermahlen werden konnte, wenn es gebrannt wurde, und dass sich hieraus unter Zugabe von Wasser eine gleichmäßig streichfähige Masse zur Beschichtung von Steinen herstellen ließ. So entstand über die Jahrtausende ein zwar geringer, aber konstanter Verbrauch von Gips, insbesondere zur Herstellung von Beschichtungen für Steine, hauptsächlich jedoch zu handwerklichen Zwecken als Modellformengips. Es dauerte jedoch bis 1755, bis in Frankreich zum ersten Mal der Chemismus entdeckt wurde, der hinter dem Einsatz von Gips steckt³²⁷. Der große Durchbruch von Gips setzte 1870 ein, als ein Verfahren zur Verzögerung der Abbindeigenschaften von gemahlenem Gips entdeckt wurde, so dass sein universeller Einsatz als Verputzmittel möglich wurde. Auch stieg der Verbrauch von Gips um diese Zeit mit der aufkommenden Produktion von Portlandzement stark an.

Ein weiterer Sprung in der Anwendung von Gips erfolgte Anfang des 20. Jahrhunderts mit der Verwendung von Gips als Baustoff zum Innenausbau und zur Modellierung. Der weltweite Verbrauch entwickelte sich von etwa 4 Mio. t kurz vor dem ersten Weltkrieg über 10 Mio. t 1925 auf etwa 100 Mio. t 1990, davon etwa 30 % in Europa. Von diesen knapp 100 Mio. t werden etwa 50 Mio. t in der Zementindustrie eingesetzt, der Rest entfällt fast vollständig auf die Herstellung von Gipsbaustoffen. Ein sehr kleiner Teil wird als Dentalgips im medizinischen Bereich eingesetzt³²⁸.

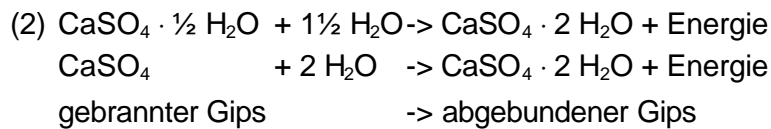
Der Prozess der Dehydration und der Hydratation, also des Wechsels zwischen Dihydrat und Anhydrat, ist reversibel. Dabei wird das an das CaSO_4 chemisch gebundene Wasser teilweise oder vollständig ausgetrieben (Dehydration) oder durch Zugabe von Wasser der zuvor gebrannte Gips zu einer mehr oder weniger festen Masse hydratisiert.



³²⁶ vgl. Janssen/Fellinger (1994, S. 92)

³²⁷ vgl. White (1998, S. 27)

³²⁸ Hamm (1991, S. 594)



Die unter (1) ablaufende Reaktion erlaubt z.B., dass aus Gips hergestellte Wandbauelemente zum Brandschutz geeignet sind. So wird bei einem Feuer zunächst das chemisch gebundene Wasser „verbrannt“, was zu einer Verlangsamung der Feuerausbreitung führt.

Das System $\text{CaSO}_4 / \text{H}_2\text{O}$ existiert in fünf verschiedenen Phasen, die sich u.a. im Kristallwassergehalt, ihrer Stabilität und ihrer Bildungstemperatur unterscheiden. Vier Phasen sind technisch bedeutsam, die fünfte Phase Anhydrit I existiert nur oberhalb von 1180°C.

	Calciumsulfat-Dihydrat	Calciumsulfat-Halbhydrat	Anhydrit III	Anhydrit II
Chemische Formel	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \text{ III}$	$\text{CaSO}_4 \text{ II}$
Formen		α -Form β -Form	α -A III β -A III	A II-s A II-u A II-E
Kristallwassergehalt (M.-%)	20,92	6,21	0	0
Bildungstemperatur		α : 80°-180°C nass β : 120°-180°C trocken	α : 110° nass β : 290°C trocken	AII-s: 300°-500°C AII-u: 500°-700°C AII-E: 700°-900°C

Tabelle 5.3: Phasen des Systems $\text{CaSO}_4 / \text{H}_2\text{O}$ ³²⁹

Die verschiedenen Phasen des Systems $\text{CaSO}_4 / \text{H}_2\text{O}$ finden in unterschiedlichen Gipsprodukten Verwendung.

Baugipse können entweder aus Dehydratationsprodukten des Calciumsulfat-Dihydrats im Niedertemperaturbereich (Stuckgips) oder im Hoch- und Niedertemperaturbereich (Putzgips) hergestellt werden. Stuckgips besteht hauptsächlich aus dem β -Halbhydrat und wird zur Herstellung von Gipskarton-Bauplatten, Gipsbauplatten, Innenputzen (Gipsputz, Gipskalkputz, Kalkgipsputz) sowie für Stuck-, Form und Rabitzarbeiten verwendet. Putzgips besteht vorwiegend aus Anhydrit II und β -Halbhydrat für Innenputze und Rabitzarbeiten.

Den Putzgipsen können als Zusätze Stellmittel und Füllstoffe zur Erzielung bestimmter Eigenschaften zugegeben werden. Für den Einsatz als Innenputz kommen hierfür Celluloseether (0,1-0,25 % Gew.-%), Stärkeether (0,01-0,05 Gew.-%), Aniontenside (0,01-0,03 Gew.-%), Abbindeverzögerer (0,1-0,2 Gew.-%), Kunststoffdispersionspulver (0,1-2 Gew.-%), Perlite (1-5 Gew.-%) sowie Hydrophobiermittel (0,1-1 Gew.-%) in Frage.

Gipskarton-Bauplatten bzw. Gipskartonplatten aus Stuckgips sind Standardplatten, die zum Befestigen auf flächiger Unterlage wie Unterkonstruktionen für Wand- und Deckenbekleidungen, für Decklagen an leichten hängenden Decken sowie für die Beplankung von Montagewänden und inneren Trennwänden auf Holzunterkonstruktionen verwendet werden. Den Gipskartonplatten können Glasgittergewebe zum Brandschutz und Hydrophobiermittel zur

³²⁹ in Anlehnung an eine Darstellung aus Gips-Datenbuch (1995)

verzögerten Wasseraufnahme zugegeben sein. Ferner werden sie mit Dämmstoffplatten aus Schaumkunststoff oder Mineralfaserdämmstoff zu Gipskarton-Verbundplatten zur Wärmedämmung verbunden.

Gipsbauplatten bzw. Vollgipsplatten sind Bauelemente für nichttragende Bauteile, die Hydrophobiermittel (Polysiloxane) zur verzögerten Wasseraufnahme sowie Aniontenside zur Herstellung leichter Platten enthalten können. Auch gängig ist die Vermischung mit Fasern zur Herstellung von Gipsfaserplatten. Ferner können sie mit Wärmedämmplatten aus Schaumkunststoff oder Mineralfasern zu Verbundplatten zusammengeführt werden.

Gipskleber und Ansetzbinder werden in der Regel aus Putzgips hergestellt und zur Befestigung und Verbindung von Gipskartonplatten und Vollgipsplatten eingesetzt. Sie können Celluloseether (0,1-1 Gew.-%) und Kunststoffredispersierpulver (0,1-3 Gew.-%) enthalten.

Estriche werden in Anhydrit- und Gipsestriche unterschieden. Sie enthalten entweder Anhydritbinder, α -Halbhydrat oder Gemische. Gebräuchliche Zusätze sind Formaldehyd-Kondensate von Naphthalinsulfonsäure und sulfoniertem Trimethylolmelamin als Fließmittel.

Modell- und Formengipse werden aus Calciumsulfat-Halbhydrat hergestellt. Es wird sehr reiner, heller Gips aus Lagerstätten oder technischen Prozessen (Citronensäureproduktion) eingesetzt. Verwendung finden dabei α -Halbhydrat oder β -Halbhydrat.

Zur Förderung des Absatzes des natürlichen und technischen Gipses wurden Anfang der 90er Jahre Papierstreichmassen aus REA-Gips sowie Füllstoffe aus REA-Gips (Gips-schaum) entwickelt. Diese beiden Produkte konnten sich jedoch nicht am Markt durchsetzen, da entgegen der damaligen Annahme der Preis der Rohstoffe höher lag als ursprünglich angenommen. Daher sind diese Produkte zwar technologisch verfügbar, jedoch nicht am Markt präsent.

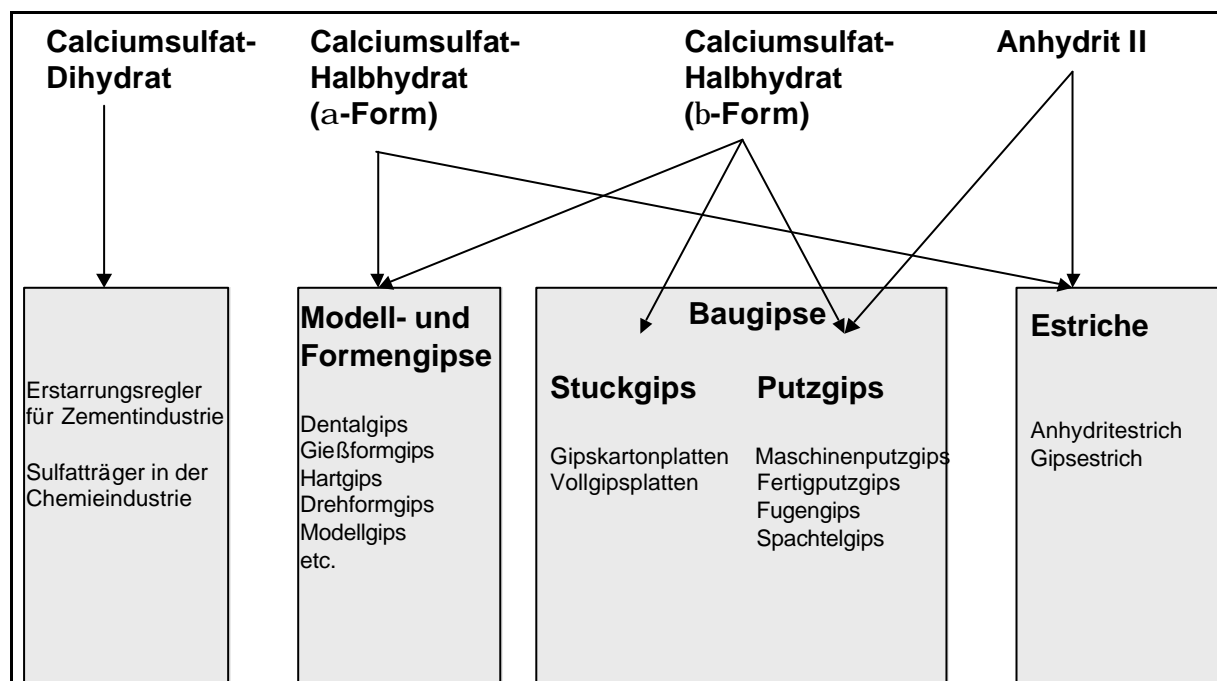


Abbildung 5.1: Produktstammbaum Gipsprodukte³³⁰

³³⁰ NLFÖ (1998, S. 15), in Anlehnung an Gips-Datenbuch (1995)

Ein Großteil der Anfang der 90er Jahre anfallenden REA-Gipsmengen aus mit Steinkohle betriebenen Kraftwerken konnte entgegen den ursprünglichen Befürchtungen der Kraftwerksbetreiber einer Verwertung zugeführt werden. Prognostizierte man Mitte der 80er Jahre noch eine Gipsschwemme aufgrund des neuartigen Angebots an REA-Gips, so zeigten sich bald Erfolge in den Vermarktungsbemühungen für REA-Gips. Neben einem REA-Gips-Export von jährlich rund 600.000 t resultierte dies in einem Anstieg der Herstellung von Gipsprodukten von 2,65 Mio. t 1983 über 4 Mio. t im Jahr 1992 auf annähernd 9 Mio. t im Jahr 1998. Anfänglich zeichnete insbesondere die sehr günstige Abgabe von REA-Gips an Gipswerke hierfür verantwortlich, die zu einer Herstellung von Bauprodukten führte, die bis dato aus anderen Materialien hergestellt worden waren (etwa nichttragende Innenwände aus Gipsplatten statt aus Ziegeln und Mauerwerk). Begünstigt wurde der Absatz von REA-Gips durch die Durchführung der Trocknung und Brikettierung bereits am Anfallort, um die Verarbeitung in den Gipswerken als Substitut für Naturgips zu ermöglichen.

Während anfänglich ein Großteil des aus braunkohlebetriebenen Rauchgasentschwefelungsanlagen anfallenden Gipses deponiert werden musste (1990: rund 1,2 Mio. t), haben sich die Verfahren mittlerweile soweit verbessert, dass die Anforderungen der Gipsindustrie insbesondere an die Weißheit des Rohstoffs im wesentlichen erfüllt werden können. Dennoch wird immer noch ein Teil des REA-Gipses aus Braunkohle aufgrund der schlechteren Materialeigenschaften (höhere Restfeuchte, zu geringer Weißgrad, zu hoher Anteil an Inertstoffen und Verunreinigungen) zur Verfüllung von Tagebaurestlöchern in einem Gemisch aus Flugasche, REA-Wasser und Gips eingesetzt³³¹.

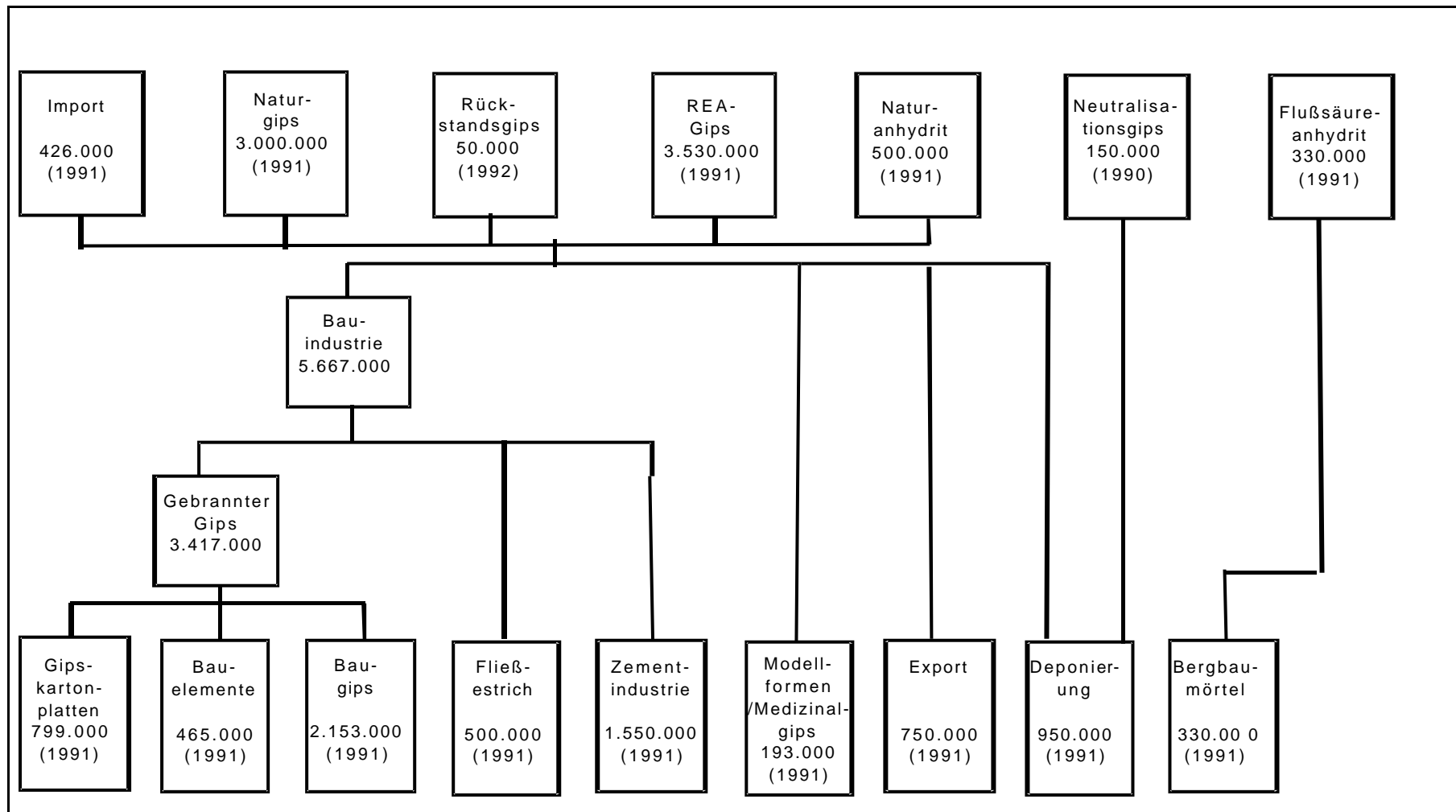
Von den rund 9 Mio. t eingesetzten Gipsmengen entfielen rund 7 Mio. t auf die Herstellung von Gipsprodukten (Baugipse (Stuckgips, Putzgips), Spezialgips, Gipsspanplatten, Gipskartonplatten) sowie 1,5 Mio. t auf den Einsatz in der Zementindustrie als Erstarrungsregler. Hinzu kommt ein Verbrauch von etwa 0,5 Mio. t außerhalb des Bauwesens, etwa als Düngemittel in der Landwirtschaft oder im medizinischen Bereich.

Eine zusätzliche Motivation für den verstärkten Einsatz von Gips und die Substitution anderer Materialien wurde durch die Preisentwicklung ausgelöst. Im Gegensatz zu den stark steigenden Erzeugerpreisen für Sand und Kies sanken die Erzeugerpreise für Gipsprodukte zwischen 1985 und 1992 um 3,5 %. In der Preisentwicklung spiegelt sich natürlich auch das stark steigende Angebot an Gips wider, etwa ausgedrückt durch die anfangs „subventionierte“ Abgabe von REA-Gips durch die Kraftwerksbetreiber. Anfang der 90er Jahre wuchs die Gipsindustrie wesentlich stärker als andere Branchen. So stieg der Umsatz der 22 deutschen Hersteller von gebranntem Gips, angekurbelt durch den günstigen Rohstoffbezug, von etwa 370 Mio. DM 1990 um mindestens 15 % jährlich und erreichte allein im 1. Halbjahr 1994 eine Höhe von 336 Mio. DM, eine Steigerung von fast 25 % gegenüber dem 1. Halbjahr 1993³³².

Seit 1997 etwa stagniert jedoch der Absatz von Gipsprodukten auf hohem Niveau. Wesentlicher Grund hierfür ist die rückläufige Nachfrage im Hochbau, was dazu führt, dass gegenwärtig Fließestrich und Putzgips auf Halde liegen. Ebenfalls zu einer Verlangsamung der Gipsnachfrage beitragen hat die Tatsache, dass REA-Gips mittlerweile einen positiven Marktwert besitzt, der zwischen 5 DM/t und 15 DM/t schwankt und damit in Konkurrenz zum Naturgips sowie zu anderen Bauprodukten steht.

³³¹ vgl. etwa Starke (1991, S. 916)

³³² vgl. Die Natursteinindustrie (Heft 5/94, S. 14) sowie (Heft 8/94, S. 28)

Abbildung 5.2: Mengenstruktur der Gipsherkunft und -verwendung in Deutschland 1991³³³³³³ in Anlehnung an Fleischer et al. (1995, S. 18)

5.1.3 Entsorgung von Gips

Die herausragende Eigenschaft des Gipses bei der Deponierung stellt das sogenannte Gips-treiben dar. Hierunter wird der Effekt verstanden, dass es bei einem Gipsüberangebot und hoher Kalkkonzentration in einem Materialgemisch (etwa Bauschutt) zur Ausbildung von säulenartigen Keimen kommt (sogenannte topochemische Ettringit-Bildung). Diese Keime führen zu hohen Druckbelastungen innerhalb des Materials und damit zu einer Festigkeitsverminderung³³⁴.

Durch die Treiberscheinung verschlechtert sich die Festigkeit von mineralischen Materialien derart, dass sie für eine direkte Wiederaufbereitung in Bauschuttrecycling-Anlagen ungeeignet werden und entsorgt werden müssen. Hinzu kommen eine Aufhebung der Wasserundurchlässigkeit sowie, bei Verwendung von mit Gips verunreinigtem mineralischem Material als Kiesersatz bei der Betonherstellung, Änderungen im Verformungsverhalten von Beton.

Der Aufbau von riesigen Gipsmengen in der „Deponie Hochbau“ führt jedoch zu Problemen beim Abbruch oder Umbau von Gebäuden. Da Gips nur im Ausbaubereich von Gebäuden eingesetzt wird, ist mit einem verstärkten Anfall von Gipsprodukten bereits in nächster Zukunft zu rechnen, da die Gebäude ab 1970 in Zukunft zum Umbau anstehen. Bereits jetzt entfallen 20 % des Bauschutts aus Ausbaumaterialien auf gipshaltige Produkte mit wahrscheinlich stark steigender Tendenz³³⁵. Beim Abbruch eines Wohngebäudes fällt ein Anteil von Ausbaumaterialien (nichttragende Konstruktionen) von 30 % an³³⁶. Rechnet man in einer lebenszyklusorientierten Betrachtungsweise die um den Faktor 3 bis 3,5 höhere Austauschhäufigkeit von Ausbaumaterialien hoch, steigt der Anteil an Ausbaumaterialien am gesamten Bauschuttaufkommen auf etwa 60 %. Bei einer gesamten Bauschuttmasse von etwa 45 Mio. t 1995 entfallen etwa 30 Mio. t auf Ausbaumaterialien und hiervon etwa 4 Mio. t auf mit Gips versetzte Produkte.

Hinzuzurechnen sind Produktionsabfälle bei der Herstellung und beim Einbau von Gips. Es ist davon auszugehen, dass diese Verschnittreste und Überschussmengen aufgrund des Angebotsdrucks bislang mit dem Haus- und Gewerbemüll entsorgt werden.

Charakteristisch ist die Vermengung von mineralischen Baustoffen mit Gips, etwa in Form von Gipsputz oder Stuck und, falls die Entwicklung in diese Richtung weiter zunimmt, in Form von Anhydritestrich. Ebenfalls häufig anzutreffen ist das Aufbringen von Putz auf Dämmmaterial. Als Verbundmaterialien liegen klassische Gipsprodukte wie Gipskartonplatten und Gips-Platten vor (Vermengung mit Holz oder Papier).

Bauschuttgranulate aus mineralischem Material, die mit Gips- und Mörtelanteilen behaftet sind, genügen nicht der Hochbauanforderung hinsichtlich Schlagzertrümmerungswert und Frostbeständigkeit³³⁷. Entsprechend sinkt der Erlös für Rezyklatmaterial aus mineralischen Fraktionen bei einem Massenanteil von Gips und Mörtel zwischen 1 % und 10 % um 30 %, liegt der Massenanteil an Gips und Mörtel zwischen 10 % und 30 %, sinkt der Erlös sogar um 70 %³³⁸. Es ist also erforderlich, mit Gips verunreinigte Bauteile und Bauelemente bei einer Bauschuttaufbereitung getrennt zu erfassen und zu bearbeiten.

³³⁴ vgl. Förstner (1994, S. 317)

³³⁵ Andrä et al. (1994, S. 116)

³³⁶ Andrä et al. (1994, S. 109); Schmitz/Stannek (1991) sprechen sogar von bis zu 40 %

³³⁷ Nicolai (1994, S. 36)

³³⁸ Nicolai (1994, S. 101)

Technisch möglich wäre eine Trennung von Gipsputz vom Untergrund durch Hochdruckwasserstrahlen. In einer Versuchsserie mit Ziegelmauerwerk, Rohmauerwerk und Bimsstein konnte eine saubere Putztrennung erreicht werden, zudem konnte das eingesetzte Wasser ohne Bedenken in die Kanalisation geleitet werden. In Abhängigkeit von Objektgröße, Anfahrtswegen und Schichtdicke dürften sich die Kosten für die Trennung allerdings auf bis zu 17 DM/qm belaufen. Unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen (Deponiepreise, Erlöse für Rezyklatmaterial) dürfte eine Gipsputztrennung zur Zeit kaum rentabel sein, zudem ist es nur für Materialien relevant, bei denen sich der Gipsputz in reiner Form auf der Oberfläche befindet³³⁹. Völlig ungeklärt ist darüber hinaus die weitere Verwendung des anfallenden, abgetrennten Gipses.

Neben den Bauschuttmengen, die wegen ihrer Verunreinigung mit Gips nicht wiederverwendet werden können und somit eine durch Gips indirekt induzierte Erhöhung der zu entsorgenden Menge darstellen, existieren auch für den Gips selbst bislang keine Verwertungsansätze, die zu einer Schließung des Materialkreislaufes führen würden. Wesentlich hierfür ist das große Angebot an Gips, insbesondere aus der Rauchgasentschwefelung und dessen preisliche Attraktivität, so dass eine genügend große Nachfrage unwahrscheinlich erscheint. Demzufolge nicht geklärt sind die Ebene einer möglichen Kreislaufführung (direkte Wiederverwendung, Wiederverwendung auf Bauteilebene, Weiterverwendung in anderen Bereichen außerhalb des Bauwesens, Weiterverwertung durch werkstoffliche Zerlegung, rohstoffliche Verwertung)³⁴⁰ sowie mögliche technische Lösungen für eine sowohl kosten- als auch umweltverträgliche Kreislaufführung.

Seit neuestem werden jedoch Denküberlegungen angestellt, den rapide steigenden Bedarf an Gips durch Rezyklierung von Produktionsabfällen, Rücknahme von Gipsresten an der Baustelle und Bauschuttrecycling zumindest teilweise zu decken³⁴¹. Ob jedoch diese Pfade angesichts des damit verbundenen technischen und organisatorischen Aufwands und der zu erwartenden zukünftigen REA-Gipsmengen aus ostdeutschen Braunkohlekraftwerken eingeschlagen werden, ist mehr als fraglich.

Auch bei der Deponierung sind Belastungen durch Gips aufgrund seiner chemischen Eigenschaften nicht ausgeschlossen:

- Es kann auf Deponien mit einem hohen Anteil an Gips durch Vermischung mit Wasser zu einer Auswaschung von im Gips enthaltenen Schadstoffen (insbesondere Quecksilber und Cadmium) und damit zu einer Grundwasserbelastung kommen. Dies trifft insbesondere auf Bauschuttdeponien zu, die sich in der Regel durch geringere Umweltauflagen im Gegensatz zu Haus- oder Gewerbemülldeponien auszeichnen.
- Die im Gips enthaltenen Sulfat-Ionen neigen dazu, andere Ionen aus anderen Materialien (etwa Chromate) zu verdrängen. Diese verdrängten Ionen gelangen ins Grundwasser, wo sie im Laufe der Zeit zu einer signifikanten Aufkonzentration führen. Dieser Effekt ist nicht nur auf Deponien, sondern bereits im zwischengelagerten Bauschutt aktiv.

³³⁹ Andrä et al. (1994, S. 57)

³⁴⁰ Daneben besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit der thermischen Verwertung, die jedoch beim Gips nicht in Frage kommt, da es sich um anorganisches Material handelt.

³⁴¹ Haug (1994, S. 312)

- Im Gegensatz zu Naturgipslagerstätten, in denen sich im Laufe ihrer Entstehung ein chemisches Gleichgewicht ausgebildet hat, bildet sich auf anthropogenen „Lagerstätten“ ein zumeist unbekannter Chemismus mit dementsprechenden Risiken.
- Die Problematik der chemischen Aktivität auf Deponien wird verschärft durch deren weite Verbreitung, während sich die Naturgipsvorkommen auf einige wenige Gebiete beschränken, in denen zumeist kein Trinkwasser gewonnen wird.

Die Entsorgungsproblematik des Gipses verdeutlicht, dass es offensichtlich nicht mehr hinreichend, lediglich zulässige Grenzwerte für Spurenelementkonzentrationen eines lokalen Entsorgungsvorhabens in Umweltmedien (Luft, Boden, Wasser) zu spezifizieren, sondern die Betrachtung sich sehr viel mehr auf diejenigen absoluten Stoffströme beziehen muss, die durch einen bestimmten Entsorgungspfad verursacht werden.

Der Ansatz, Rückstände aus der Rauchgasreinigung wie REA-Gips zu Sekundärmaterial aufzuarbeiten und als Wirtschaftsgut in den Baustoffkreislauf einzubringen, stellt einen aus Sicht des Rückstandserzeugers sehr begrüßenswerten Weg dar, da es ihm gelingt, die stoffliche Verwertung seines Rückstands nachzuweisen. Bei näherer Betrachtung fällt jedoch auf, dass es sich bei der Verwertung von REA-Gips im Baubereich lediglich um eine zeitlich befristete Deponierung des Stoffes handelt und keinesfalls um eine dauerhafte Senke.

Neben der zukünftigen Problematik des Umgang mit Gips in der Abfallwirtschaft und der vermeintlich „günstigen“ Entsorgung von REA-Gips durch die Kraftwerksbetreiber müssen auch Überlegungen hinsichtlich der Versorgungssicherheit mit Gips in Zukunft angestellt werden. Die bekannten Gipsreserven in Deutschland besitzen nach konservativen Schätzungen eine Reichweite von etwa 30-50 Jahren³⁴², wobei eine gleichbleibende Abbaurate unterstellt wird. Da ein Import von Gips im großen Stil auf Grund des geringen spezifischen Materialwerts (ca. 10-20 DM/t) über große Strecken unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen unrentabel ist, müssen bis 2050 alternative Quellen zur Sicherung der Versorgung mit Gips bereitstehen.

Auch die Erzeugung von technischem Gips aus der Rauchgasentschwefelung unterliegt exogenen Einflussfaktoren. So könnte aus Gründen des Klimaschutzes und einer zunehmenden Rohstoffverknappung bei Kohle die Energieerzeugung aus Kohle eingeschränkt werden, oder auf schwefelärmere Importkohle als Energieträger umgestiegen werden. Ebenso geht die Produktion von REA-Gips zurück, wenn Kalk³⁴³ nicht mehr im gewünschten Umfang zur Verfügung steht.

Unter der Annahme eines gleichbleibenden Bedarfs an Gipsprodukten bis zum Jahr 2050, der dann ausschließlich zur Befriedigung der Ersatznachfrage dient, müssen größere Teile der bereits jetzt im Baubestand befindlichen Gipsprodukte als Rohstoffreserven zur Verfügung stehen, wenn eine Ressourcenknappheit vermieden werden soll.

³⁴² BGR (1998)

³⁴³ Soll als Nebenprodukt der Rauchgasentschwefelung Gips entstehen, muss das Kalkwäscheverfahren angewendet werden. Hierzu ist für jede Tonne REA -Gips 0,6 Tonnen Kalk erforderlich.

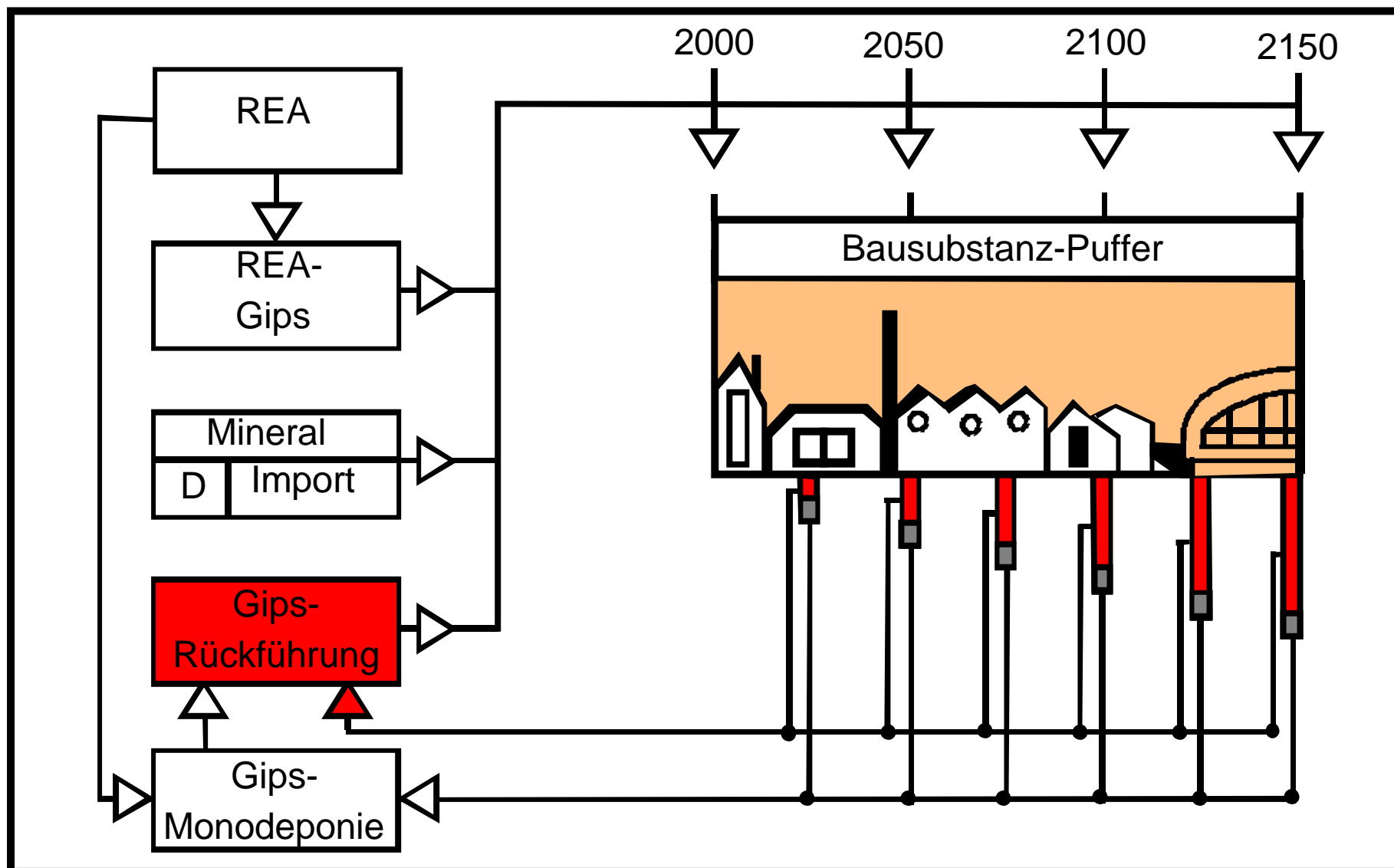


Abbildung 5.3 : Stoffstrom Gips in und aus dem Bausubstanz-Puffer

Wie der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen ist, können verschiedene Trends ausgemacht werden:

- Weltweit dürfte die Rauchgasentschwefelung in den kommenden 50 Jahren noch zunehmen. Zurückzuführen ist dies zum einen auf die Zunahme der Entschwefelung von kohlebefeuelten Kraftwerken in Entwicklungsländern, den weiteren Ausbau der Kapazitäten kohlebefeuelter Kraftwerke in Entwicklungsländern sowie verstärkter REA-Gips-Anfall aus der Nicht-Kohle-Verbrennung wie etwa der Müllverbrennung.
- Gleichzeitig schrumpft das Naturgipsangebot kontinuierlich. Diese Annahme kann vermutlich solange aufrecht erhalten werden, solange ein starkes Angebot an REA-Gips verfügbar ist. Es kann jedoch bereits ab etwa 2040 zu lokalen Versorgungsengpässen kommen.
- Ab 2050 sinkt der weltweite REA-Gips-Anfall durch zunehmenden Verzicht auf den Einsatz fossiler Brennstoffe, insbesondere Kohle, zur Energieerzeugung. Gleichzeitig sinkt damit das Gesamtangebot an Gips, was wiederum, eine gleichbleibende Nachfrage über die Zeit voraus gesetzt, zu einer Unterdeckung etwa ab 2100 führen könnte.

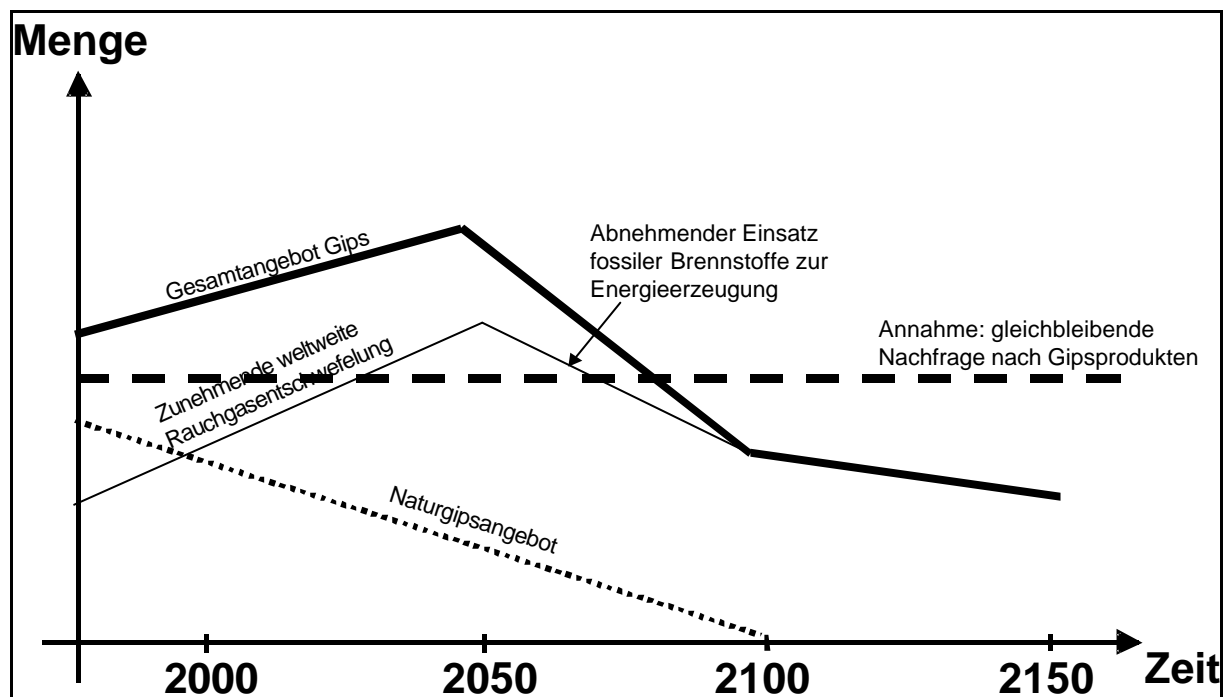


Abbildung 5.4: Mögliche zukünftige Entwicklung von Gipsangebot und Gipsnachfrage

5.2 Ermittlung der Modellparameter für Gips

5.2.1 Dispersionsgrade von Gipsprodukten

Ausgehend von der Zielsetzung, eine kreislaforientierte Betrachtung der Materialien und Rohstoffe anzustellen und dazu auf den in der Technosphäre temporär befindlichen Ressourcenvorrat zurückzugreifen, liegt mit dem Dispersionsgrad ein qualitatives Beschreibungsmaß vor, mit dem die Kreislauffähigkeit der unterschiedlichen Produkte unter den heu-

tigen Randbedingungen beurteilt wird³⁴⁴. Die Untersuchung der Kreislauffähigkeit beginnt zunächst auf der Ebene der Güter, in denen der Stoff vorhanden ist, und fragt nach den technologischen, ökologischen, ökonomischen und wahrnehmungsbezogenen Gesichtspunkten, die mit diesem Produkt verknüpft sind. Alle Bewertungen nach den einzelnen Kriterien sind wiederum maßgeblich von der Art und dem Ausmaß der Einbindung des Stoffes in andere Gefüge, also seiner Dispersion, abhängig.

Nach der Zuordnung der Dispersionsgrade zu den Gütern wird die Betrachtungsebene des Gutes verlassen und auf Basis der verschiedenen Dispersionsgrade die Rückführbarkeit des Stoffes aus dem technosphärischen Zwischenlager in die Primärproduktion beurteilt. In den folgenden Ausführungen wird anhand der zu erwartenden Abfallströme eines bestimmten Dispersionsgrads zu untersuchen sein, wie die Rückführbarkeit des Stoffes in den technosphärischen Kreislauf verbessert werden kann.

Die nachfolgende Tabelle 5.12 gibt einen Überblick über diejenigen Gipsprodukte, die zur Betrachtung und Bestimmung ihres Dispersionsgrads herangezogen werden. Es wären zwar noch weitergehende Aufteilungen möglich, die die unterschiedlichen Rezepturen und Produktdifferenzierungen für unterschiedliche Anwendungsfälle im Baubereich berücksichtigen. Die Verschiedenartigkeit rührt jedoch im wesentlichen von Stoffzusätzen in geringen Mengen her, die für die prinzipielle Eignung zur Rückführbarkeit aus dem technosphärischen Lager nicht weiter betrachtet werden soll³⁴⁵.

Gipsprodukt	Eigenschaft, Verwendungszweck, Umrechnungshinweise
Anhydritestrich	Besteht zu 40-80 % aus Anhydrit und wird auf Kunststoffolie aufgetragen, um vom schwimmenden Estrich getrennt zu werden ³⁴⁶
Gipsestrich	Verwendungshäufigkeit etwa 1/3 von Anhydritestrich
Putzmörtel	Wird für Innenputz eingesetzt, konkurriert hierbei mit Putzen auf Kalkbasis (Verwendung ca. 65 % Gips, insbesondere in Form des auf wärmedämmendes Mauerwerk aufgetragenen Leichtputz). Macht einen großen Teil der statistischen Kategorie Baugipse aus ³⁴⁷
Gipskleber	Wird zur Befestigung von Gipsplatten eingesetzt. Wird statistisch unter Baugipsen geführt, Annahme etwa 5 % des Verbrauchs ³⁴⁸
Ansetzbinder	Wird zur Befestigung von Gipskarton- und Gipsfaserplatten eingesetzt. Ebenso wie Gipskleber als Baugips geführt, Verbrauch abhängig von der Zahl befestigter Platten. Annahme: 5 % des Verbrauchs
Vollgipsplatte	auch Gipswandbauplatte genannt. Sie kann mit Fasern, Füll- und Zuschlagstoffen versehen sein ³⁴⁹

³⁴⁴ vgl. Kapitel 4.1

³⁴⁵ vgl. BUWAL (1995, S. 117). Den Gipsplatten und Gipskartonplatten werden zum Einsatz in Feuchträumen Zusatzstoffe wie Polysiloxane, Celluloseether und Aniontenside in geringen Mengen beigemischt. Da es sich ausschließlich um organische Substanzen handelt, dürfte eine Beeinträchtigung von Verwertungsoptionen nur in geringem Umfang gegeben sein. Vgl. auch Gips-Datenbuch.

³⁴⁶ BUWAL (1995, S. 82)

³⁴⁷ BUWAL (1995, S. 84)

³⁴⁸ BUWAL (1995, S. 80)

³⁴⁹ Gips-Datenbuch (1995, S. 44)

Gipsprodukt	Eigenschaft, Verwendungszweck, Umrechnungshinweise
Vollgipsplatte zur Wärmedämmung	Mit Wärmedämmplatten (Schaumkunststoffe, Mineralfaserplatte) werkmäßig verbundene Gipsplatte. Ca. 10 % der Vollgipsplatten ³⁵⁰
Gipsfaserplatte	Mit Fasern verstärkte Vollgipsplatte, die erst seit 1995 verstärkt hergestellt wird. Wird im Hinblick auf Recycling ökologisch als bedenklich eingestuft ³⁵¹
Gipskartonplatte	Aus der statistischen Erhebung (dort in qm gelistet) mit 8 kg/qm umgerechnet ³⁵²
Gipskartonplatte z. Wärmedämmung	Siehe Vollgipsplatte zur Wärmedämmung. Umrechnungsfaktor 12 kg/qm.
Modellformengips	Rezyklierung innerhalb der Keramikindustrie wird bereits praktiziert, außerhalb Keramikindustrie keine Kreislaufführung
Zement	Rezyklierung auf stofflicher Ebene nicht mehr möglich, jedoch immobile Einbindung in Zementmatrix vorhanden. Jährlicher Gipsverbrauch ca. 5 % der jährlichen Zementproduktion
Medizinalgips	Geordnete Entsorgung

Tabelle 5.4: Charakteristika von wichtigen Gipsprodukten

Im folgenden werden einige Hinweise zu den Ausprägungen verschiedener Gipsprodukte im Hinblick auf die Kriterien zur Bestimmung des Dispersionsgrads gegeben. Die Reihenfolge orientiert sich an der Reihenfolge der Beschreibung der Kriterien in Kapitel 4.1.

Technologische Kriterien

Verbindungsstruktur	Aus der Einteilung ergibt sich zum Beispiel für eine mit tragenden Wänden verschraubte Gipskartonplatte, bei denen die Gipskartonplatte die gewünschte abzutrennende Komponente darstellt, ein Ausprägungsgrad von 4. Hingegen müsste ein auf der Wand aufgetragener Gipsputz mit einem Ausprägungsgrad von etwa 9 belegt werden, da zur Zeit nur das sehr aufwändige Trennverfahren mit Hilfe von Mikrowellen zur Verfügung steht.
Monostruktur	Eine Vollgipsplatte ist nach dieser Klassifikation mit dem Ausprägungsgrad 1-2 zu bewerten, eine Gipskartonplatte als Komponente mit 5, Beton/Zement ohne besondere Zusätze ebenfalls mit 1-2. Hingegen muss für Gipsputz ein Ausprägungsgrad von 8-9 angenommen werden, da dieser zusammen mit dem Untergrund als Komponente betrachtet werden muss.
Recyclingeignung	Bezogen auf Gipsprodukte ergibt sich hier ein differenziertes Bild. Während einige Faktoren auf alle Gipsprodukte in gleichem

³⁵⁰ BUWAL (1995, S. 63)

³⁵¹ Gem. mündlicher Auskunft Dr. Kersten, Bundesverband Gips- und Gipsbauplattenindustrie, 1998

³⁵² Gips-Datenbuch (1995, S. 37)

Maße zutreffen (Materialeigenschaft), differieren andere Kriterien in zum Teil erheblichem Umfang. Analog wie bei den anderen technologischen Kriterien Verbindungsstruktur und Monostruktur ergeben sich auch bei der Recyclingeignung günstigere Einschätzungen für Vollgipsplatten und Gipskartonplatten, während Putze aufgrund ihrer aufwändigen Sortierbarkeit, der fehlenden Materialkennzeichnung sowie der häufig unterschiedlichen Rezepturen und dem daraus folgenden unbekannten Gehalt an Wertstoffen bzw. Schadstoffen einem ungünstigeren Ausprägungsgrad zugeordnet werden. Beabsichtigt man, etwa für Putze die Einschätzung nachhaltig zu verbessern, bieten sich als Ansatzpunkte bei der Produktherstellung eine stärkere Vereinheitlichung von Rezepturen sowie eine verstärkte Kennzeichnung der Materialien an³⁵³.

Ökologische Kriterien

Deponierfähigkeit

Gipsprodukte sind hinsichtlich des Kriteriums der Deponierfähigkeit kritisch zu betrachten³⁵⁴. Bei lokalen Gipsüberangeboten auf der Deponie kommt es zum Prozess des Sulfattreibens, bei dem Schwermetall-Ionen anderer Baustoffe durch Sulfationen des Gipses ausgetrieben und ins Grundwasser transportiert werden können. Hierdurch kommt es gleichfalls zu einer Verminderung der Festigkeit des Deponiekörpers. Von besonderer Bedeutung in diesem Zusammenhang ist, dass ein Großteil der Baureststoffe auf Baurestmassendeponien gelagert werden, die weniger gut abgedichtet sind als herkömmliche Deponien und damit die Auswirkungen des Sulfattreibens noch verstärken. Für Gipsprodukte gilt, wie auch für die meisten anderen Bauprodukte, dass die Deponierung immer noch die mit Abstand häufigste Senke beim Umgang mit Baurestmassen darstellt³⁵⁵.

Diese Überlegungen führen zu folgender Einschätzung von Gipsprodukten: Putze können aufgrund ihres verdünnend wirkenden Untergrundträgers bis zu einer bestimmten Konzentration als wenig schädlich im Deponiekörper angesehen und daher mit einem Ausprägungsgrad von 4 bewertet werden. Gipsplatten hingegen verursachen lokale Gipsüberangebote mit entsprechenden Risiken, sie werden mit einem Ausprägungsgrad von 7-8 bewertet. Gips im Zement hingegen kann auf der Deponie als wenig schädlich angesehen werden (Ausprägungsgrad 2). Im

³⁵³ Eine derartige Kennzeichnung ist häufig nicht am Material selbst möglich, kann jedoch mit Hilfe eines Baustoffpasses ermöglicht werden (vgl. Jörissen et al., 1993, S. 120). In diesem Baustoffpass werden Angaben über verwendete Bauprodukte und ihre stoffliche Zusammensetzung sowie ggf. auch der Hersteller vermerkt. Somit würden sowohl dem Abrissunternehmer als auch dem Hersteller von Sekundärbaustoffen die erforderlichen Hinweise auf die angemessene Behandlung gegeben werden. Sowohl die direkte Materialkennzeichnung als auch der Baustoffpass müssen jedoch intensiv gepflegt werden, um auch bei der Langlebigkeit der Produkte nach 50 bis 100 Jahren noch Aussagen erhalten zu können.

³⁵⁴ vgl. hierzu Kapitel 5.1.3

³⁵⁵ Untersuchungen in Oberösterreich haben gezeigt, dass nur etwa 15 % der Baurestmassen wieder- oder weiterverwertet werden. Über 60 % der vermutlich anfallenden Baurestmassen geht gar einen völlig unbekannten Entsorgungsweg. (Glenc et al., 1996, S. 155)

	Fall einer extremen Zerkleinerung des Zementsteins würde der Gips im Zementstein jedoch wie Putz wirken.
Ressourcenschonung	Für Gipsprodukte ergibt sich erneut ein differenziertes Bild der Bewertung hinsichtlich der Ressourcenschonung. Insbesondere Vollgipsplatten eignen sich für eine spätere Wiederverwendung und erlauben somit eine Substitution von Primärmaterialien. Gleiches könnte grundsätzlich auch auf Gipskartonplatten zutreffen, jedoch sind im Moment sowohl technische als auch logistische Fragestellungen der Aufbereitung noch ungeklärt. Putze wiederum sind so stark mit anderen Materialien vermischt und durch den Gebrauch verändert, dass aufgrund des hohen Aufwands lediglich der Pfad der Deponierung zur Zeit beschriftet werden kann.
Schadstoffgehalt	Die im Bauwesen befindlichen Gipsprodukte dürften grundsätzlich in günstige Ausprägungsgrade eingestuft werden, da signifikante Zusätze von Schad- und Störstoffen nicht bekannt sind. Daran hat sich auch durch die Verwendung von REA-Gips wenig geändert, der im wesentlichen eine ähnliche Zusammensetzung mit Spurenelementen aufweist wie der Naturgips ³⁵⁶ . Allerdings sollte der wesentlich höhere Quecksilberanteil im REA-Gips für die Zukunft beachtet werden ³⁵⁷ . Für Vollgipsplatten ist bekannt, dass etwa ein Anteil von 20 % Siloxane als Hydrophobiermittel zum Einsatz in Nassräumen enthält ³⁵⁸ .
Ökonomische Kriterien	
Separierungskosten	Die Zuordnung von Ausprägungsgraden auf Gipsprodukte hinsichtlich des Kriteriums der Separierungskosten wird maßgeblich von der verfügbaren Technologie bestimmt. Für Gipskartonplatten wird ein Verfahren beschrieben, bei dem in einem Rollensystem die Kartonhaftung durch Zerstörungen in der Oberfläche des Gipskerns beseitigt wird. Alternativ dazu können die Platten in unterschiedlichen Brechersystemen wie etwa Schneckenzerkleinerern zerkleinert und anschließend vermahlen werden ³⁵⁹ . Voraussetzung zur Durchführung dieser Maßnahmen ist jedoch die vorherige manuelle Auslese der Gipskartonplatten. Angesichts der verfügbaren, aber noch nicht wettbewerbsfähigen Technologien können Gipskartonplatten mit dem Ausprägungsgrad 5-6 beschrieben werden. Günstiger zu bewerten sind Vollgipsplatten, da als Kosten im wesentlichen nur die manuelle Sortierung sowie der anschließende Mahlvorgang bzw. die direkte Wiederverwendung anfal-

³⁵⁶ vgl. Beckert, Einbrodt, Fischer (1991, S. 51)

³⁵⁷ vgl. Kapitel 5.1.1.2

³⁵⁸ BUWAL (1995, S. 63) sowie Kapitel 5.1.2

³⁵⁹ vgl. Gewiese (1998, S. 87) sowie mündliche Auskunft von Herr Kersten, Bundesverband Gips, 1999

len. Eine Bewertung mit dem Ausprägungsgrad 2-3 erscheint angemessen.

Putze wiederum gelangen zur Zeit beim Abbruch mit der mineralischen Fraktion zur Baustoff-Aufbereitung, werden dort in der Feinfraktion angereichert³⁶⁰ und anschließend deponiert. Eine Separierung im Rahmen der Bauschutttaufbereitungsanlage ist nicht möglich. Alternativ erprobte Verfahren wie das in Andrä et al. beschriebene Hochdruckwasserstrahlen mit Kosten von 17 DM/m² gereinigter Fläche sind bislang noch nicht angenommen worden, da sie nicht wettbewerbsfähig sind³⁶¹. Zudem ermöglicht sie lediglich dem unter dem Gipsputz liegenden Mauerwerk eine Verwertung durch Abreicherung von Gips. Auch die zur Zeit erforschte Anwendung der Mikrowellentechnik auf die Ablösung von Gipsputz vom Untergrund ist noch weit von Einsatzreife und Wettbewerbsfähigkeit entfernt³⁶². Demzufolge muss den Putzen hinsichtlich der Separierungskosten ein Ausprägungsgrad 8-9 zugewiesen werden.

Logistikkosten

Die vorhandenen Gipsprodukte müssen alle mit einem ungünstigen Ausprägungsgrad zwischen 7 und 9 hinsichtlich der Logistikkosten bewertet werden. Dies ist im wesentlichen auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- Es fehlt eine Verwertungsinfrastruktur für Gipsredukte. Bestehende Anlagen haben zur Zeit nur Forschungscharakter³⁶³.
- Aufgrund des großen Angebots an Gips, insbesondere in den letzten 15 Jahren, waren bislang keine Anreize vorhanden, eine gezielte Verwertungsplanung für Gipsredukte durchzuführen.
- Die erforderliche separate Erfassung und Behandlung von Gips beim selektiven Rückbau erfordert jetzt schon einen größeren Planungs- und Durchführungsaufwand³⁶⁴.
- Für einzelne Produkte (z.B. Gipskartonplatten) ist der Anfall bislang zu gering, als dass eine Verwertungsinfrastruktur hätte entstehen können.

Existierender Sekundärrohstoffmarkt

Im Hinblick auf Gipsredukte aus dem Bausektor gibt es bislang noch keine Bemühungen, einen Sekundärrohstoffmarkt zu etablieren. Wesentliche Gründe hierfür sind das gegenwärtige Überangebot an Gips sowie das bislang in den Deponiepreisen nur

³⁶⁰ vgl. Schachermayer et al. (1996, S. 31)

³⁶¹ Andrä et al., Baustoff-Recycling, 1994, S. 57 f. Schultmann (1998, S. 42) spricht sogar von Kosten zwischen 15 – 54 DM/m²

³⁶² vgl. Link, Feher (1999, S. 5)

³⁶³ vgl. Kapitel 6.2.3

³⁶⁴ vgl. Palinkas/Weber (1996, S. 133); Rentz et al. (1997, S. 236): „Gipsanwendungen im Hochbau verursachen besondere Probleme beim Baustoffrecycling. Die Demontage dieser Produkte bereitet noch erhebliche Schwierigkeiten.“

unzureichende abgebildete Gefährdungspotenzial von zu stark gipshaltigem Bauschutt. Auf eine Bewertung dieses Kriteriums im Hinblick auf den Ausprägungsgrad soll an dieser Stelle verzichtet werden. Die aktive Initiierung von Marketingmaßnahmen stellt jedoch eine in Zukunft essenzielle Aufgabe bei der angestrebten Kreislaufwirtschaft von Gipsprodukten dar.

Individuell-wahrnehmungsbezogene Kriterien

Akzeptanz

Bezüglich der Akzeptanz der Gipsprodukte muss festgestellt werden, dass zunächst noch eine umfangreiche Informationsarbeit sowie die Gestaltung und Vermittlung eines Handlungsrahmens erforderlich sind. Die Notwendigkeit wird zur Zeit noch nicht gesehen, dies ist im wesentlichen auf das große Angebot an synthetischem Gips aus der Rauchgasentschwefelung zurückzuführen. Die Diskussion zum Umgang mit Gips im Entsorgungspfad beginnt aber aufgrund der langsam steigenden Abfallmengen von Gips und der daraus resultierenden negativen Eigenschaften für andere mineralische Materialien.

Förderung des Umweltbewusstseins

Auf eine Bewertung von Gips unter dem Gesichtspunkt der Förderung des Umweltbewusstseins wird an dieser Stelle verzichtet. Gips besitzt im Vergleich zu alternativen Produkten einen neutralen Stellenwert bezüglich der Einschätzung seiner ökologischen Stärke und wird nicht speziell herangezogen, wenn es darum geht, Auswahlentscheidungen zu Baumaterialien unter ökologischen Gesichtspunkten zu treffen.

Die zusammengefasste Darstellung der Bewertung mit Ausprägungsgraden stellt den Versuch dar, die Ausführungen zu den Bewertungskriterien auf die heute im Lager Bauwesen befindlichen Gipsprodukte zu übertragen. Die vergebenen Bewertungen und insbesondere die Festlegung des Gesamtwertes Dispersionsgrad bleiben letztendlich subjektiv und sind in der Regel nur qualitativ begründbar. Anhand der Bewertungen ist erkennbar, dass die Verwendungsgruppe der Baugipse relativ homogen mit einem ungünstigen Dispersionsgrad bewertet muss. Dies liegt im wesentlichen zunächst an der technologisch bedingten Struktur der Baugipse und ihrer ungünstigen Recyclingeignung, und schlägt sich auch in den ökonomischen und individuellen Kriterien nieder. Gipsplatten hingegen werden grundsätzlich günstiger bewertet, allerdings zeigt sich hier, dass bei Erfüllung grundsätzlicher technologischer Eigenschaften zur Reduktbehandlung andere Kriterien ein größeres Gewicht erhalten und zu einer Differenzierung innerhalb der gleichen „Produktfamilie“ führen. Bei den sonstigen Gipsanwendungen ist der Zement zu beachten, eine Kreislaufführung ist hier zwar auf stofflicher Ebene nicht möglich, aber auf der Ebene des Redukts technologisch realisierbar und ökologisch günstig einzuschätzen, wenn auch ökonomisch bei weitem noch nicht umgesetzt.

Gipsprodukt		Technologische Kriterien			Ökologische Kriterien			Ökonomische Kriterien			Individuelle Kriterien		Dispersionsgrad
		Verbindungsstruktur	Monostruktur	Recyclingeignung	Deponierfähigkeit	Ressourcenschonung	Schadstoffgehalt	Separierungskosten	Logistikkosten	Exist. Recycl.-Markt	Akzeptanz	Umweltbewusstsein	
Baugipse	Anhydritestrich	9	9	8	4	8	2	8	9	9	8	-	8
	Gipsestrich	9	9	8	4	8	2	8	9	9	8	-	8
	Putzmörtel	9	10	9	4	7	4	9	9	9	8	-	9
	Gipskleber	10	9	9	4	8	2	10	9	9	8	-	9
	Ansetzbinder	10	9	9	4	8	2	10	9	9	8	-	9
Gipsplatten	Vollgipsplatte	3	2	2	8	3	4	3	8	9	5	-	3
	Vollgipsplatte zur Wärmedämmung	6	6	5	7	5	6	3	8	9	5	-	6
	Gipsfaserplatte	3	9	9	7	9	4	3	9	9	5	-	7
	Gipskartonplatte	4	4	2	7	5	4	5	8	9	5	-	5
	Gipskartonplatte zur Wärmedämmung	6	6	5	7	7	6	5	8	9	5	-	7
Sonstige Anwendungen	Modellformengips in der Keramikindustrie	3	3	1	9	1	4	2	1	2	1	-	2
	Modellformengips nicht Keramikind.	3	3	1	9	1	8	2	5	7	4	-	4
	Medizinalgips	3	3	10	9	10	10	2	5	9	2	-	4
	Zement	10	1	3	2	2	3	8	8	6	8	-	6

Tabelle 5.5: Übersicht über die Ausprägungsgrade von Gipsprodukten und daraus resultierende produktspezifische Dispersionsgrade

Aus der Zuordnung zu Dispersionsgraden können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Baugipse sind grundsätzlich in einem ungünstigen Dispersionskompartiment klassifiziert, d.h. dass die Möglichkeit zur Kreislaufführung sowohl technologisch als auch ökonomisch stark eingeschränkt ist. Allerdings ist die günstige Einschätzung hinsichtlich der Deponierung zu beachten, weswegen hieraus für das Stoffstrommanagement dieser Produktgruppe folgt, dass die Deponierung eine geeignete Senke zu sein scheint³⁶⁵. Es ist jedoch sehr zweifelhaft, ob es sinnvoll ist, für einen derart großen Teil des Materialstroms Gips (40 – 50 % der gesamten im Baubestand befindlichen Massen an Gips entfällt auf die Produktgruppe Baugipse, nimmt man den im Zement gebundenen Gips aus, sind es sogar 60 – 70 %)³⁶⁶ einen „Durchflussreaktor“ durch Einweganwendungen zu erzeugen.
- Für die Produktgruppe der Gipsplatten fehlt es an Konzepten zur Realisierung der Kreislaufwirtschaft, obwohl die technologischen Voraussetzungen grundsätzlich vorhanden sind. Es muss jedoch bereits jetzt beachtet werden, dass zunehmende Produktdifferenzierungen wie die Einführung der Gipsfaserplatte oder der Einsatz der Gipsplatten zur Wärmedämmung oder in Feuchträumen die Komplexität und damit die Kosten zur Realisierung der Kreislaufkonzepte erhöhen und die Akzeptanz verringern werden. Die verbleibende Zeit bis zu einem signifikanten Anstieg des Rückflusses von Gipsplatten aus dem Zwischenlager Bau sollte daher für die Entwicklung von Konzepten genutzt werden, um mit den rund 35 Mio. t Gips, die in Deutschland zur Zeit in Form von Gipsplatten im Baubereich vorhanden sind, ökologisch sinnvoll umzugehen.
- Der Modellformengips in der Keramikindustrie ist ein gutes Beispiel für die erfolgte Realisierung einer Kreislaufführung von Gipsprodukten.
- Der umweltgerechte Entsorgungspfad des Medizinalgipses stellt aufgrund des hohen Schadstoffgehalts und der geringen Recyclingeignung die Deponierung dar. Trotz der Einweganwendung ist die Einschätzung von Medizinalgips hinsichtlich des Dispersionsgrads günstig.
- Für Zement steht nicht der Gips, sondern die Frage nach einer Kreislaufführung des „Trägerstoffs“ Zement im Vordergrund. Hier lässt sich aufgrund der Bewertung ablesen, dass die günstige ökologische Einschätzung (positiver Beitrag zur Ressourcenschonung, im wesentlichen unbedenkliche Schadstoffgehalte, gute Deponierfähigkeit) noch mit den ungünstigen ökonomischen Bedingungen konkurrieren muss.

³⁶⁵ zu Einschränkungen hinsichtlich dieser Feststellung vgl. Kapitel 2.2.3

³⁶⁶ Ohne Berücksichtigung der bereits wieder ausgetragenen Mengen an Gips aus dem Baubereich wird das Gesamtlager Gips in Deutschland auf 180 – 200 Mio. t geschätzt, wovon etwa 80 Mio. t auf Baugipse entfallen.

5.2.2 Verweilzeit von Gipsprodukten

Ausgehend von den aufgestellten Hypothesen über die Beschreibung der Einflussfaktoren zur zeitlichen Verteilung des Anfalls von Bauschutt und der bereits am Ende von Kapitel 4.2.1.1 formulierten Schwierigkeit, im Baubereich statistisch belastbare Daten für die Schätzung der Parameter von Wahrscheinlichkeitsfunktionen zu generieren, wird qualitativ die Anwendung von Verteilungsfunktionen zur Bestimmung der Verweilzeit von Gipsprodukten und anschließenden Prognose zukünftiger Gipsabfallströme begründet³⁶⁷:

- Die jetzt im Bauwesen befindlichen Gipsprodukte, und nur diese, führen eines Tages zu einem Bauabfallstrom.
- Die Verweilzeit der Gipsprodukte unterliegt einer probabilistischen Streuung um einen Mittelwert.
- Die Existenz eines Mittelwerts wird durch die Gesetzmäßigkeit der strategischen Baubewirtschaftung begründet.
- Die Höhe des Mittelwerts ist abhängig vom Gipsprodukt und seiner Verwendung.
- Die Streuung um den Mittelwert ist von einer Reihe von Faktoren abhängig (Gebrauchverhalten, Umfeldbedingungen, Bewertung der funktionalen Lebensdauer etc.).

Diese Rahmenbedingungen (Existenz eines Mittelwerts, unterschiedliche Streuung, fehlende statistische Erhebungen) lassen den Einsatz der Weibull-Funktion zur Schätzung der Verweilzeit (bzw. genauer gesagt: der Ausfallzeit) von Gipsprodukten im Lager Bauwesen möglich erscheinen. Es müssen also für jedes Gipsprodukt im Bauwesen die Parameter der Weibull-Verteilung (Mittelwert, α zur Beschreibung des Ausfallverhaltens) aufgrund der Hypothesen qualitativ geschätzt werden.

Die durchschnittliche Lebensdauer von Putzmörtel wird allgemein mit 30 Jahren angesetzt³⁶⁸, da er zu den nichttragenden Innenausbaustoffen zugeordnet wird, die in der Regel bei Modernisierung als Bauschutt anfallen. Zur Berücksichtigung der Tatsache, dass bei einer Modernisierung nicht alle Innenausbaustoffe als Bauschutt anfallen, wird dieser Wert leicht nach oben korrigiert und mit $T=35$ angesetzt. Die Schwankung wird eher im unteren Bereich angesetzt mit der Wahl von $\alpha = 4$.

Estriche erhalten gemäß der Auflistung in Kleiber mit $T = 30$ einen etwas niedrigeren Mittelwert zugewiesen³⁶⁹. Durch die Wahl von $\alpha = 6$ soll dokumentiert werden, dass spätestens nach Ablauf von 40 Jahren keines dieser Bauprodukte noch im Baubestand verweilt.

Für Gipsplatten liegen noch geringere Erfahrungen mit der Verweilzeit vor als mit Gipsputz und Estrich. Hier wird der Wert von Kleiber übernommen, der eine durchschnittliche Lebensdauer von $T = 40$ annimmt. Die Berücksichtigung der großen Unsicherheit in der Schätzung des zukünftigen Plattenaufkommens wird durch die Wahl von $\alpha = 2$ ausgedrückt. Eine breitere Streuung erscheint zumal auch plausibel, weil Gipsplatten eher den Einflüssen der funktionalen Lebensdauer (Ästhetik, Komfort, Änderung in den Nutzungs- und Gebrauchsanforderungen) ausgesetzt sind und leichter Bestandteil einer kleineren Modernisierung sein kön-

³⁶⁷ vgl. Hypothesen 1-5 in Kapitel 4.2.1.2

³⁶⁸ Andrä et al. (1994, S. 110), BUWAL (1995, S. 116), Gewiese (1998, S. 82); ITAS/ifib nennen in Abhängigkeit des Gebäudealters 25-40 Jahre.

³⁶⁹ vgl. Kleiber (1991)

nen. Gipskleber und Ansetzbinder werden aufgrund ihrer Verwendung im Zusammenhang mit Gipsplatten genauso bewertet.

Für den Modellformengips in der Keramikindustrie wird aufgrund des bereits etablierten Kreislaufs ein Mittelwert von $T = 5$ Jahren angesetzt, verbunden mit einer stark deterministischen Bewertung $\alpha = 10$. Modellformengipse in anderen Industrien werden nicht im Kreislauf geführt und stellen ein Durchflussprodukt dar, daher wird der Mittelwert auf $T = 1$ Jahr festgesetzt und die Streuung ebenfalls mit $\alpha = 10$ stark eingengt³⁷⁰.

Gleiches gilt auch für den Medizinalgips, hier erscheint eine Bewertung analog den Modellformengipsen in anderen Industrien mit $T = 1$ Jahr und $\alpha = 10$ angemessen.

Beim Zement schließlich handelt es sich um einen Baustoff, der in tragenden Konstruktionen eingesetzt wird und daher eine sehr lange Verweilzeit aufweist, die in der Regel mit der Gesamtlebensdauer des Gebäudes identisch ist. Die Angaben über durchschnittliche Lebensdauern von Gebäuden schwanken naturgemäß erheblich zwischen 50 Jahren (Nichtwohngebäude) bis über 100 Jahre (ältere Wohngebäude)³⁷¹. Da ein großer Teil der Zementproduktion erst in jüngerer Zeit für Beton eingesetzt wurde, woraus wiederum Gebäude mit einer geringeren Lebenserwartung entstanden sind, erscheint es angemessen, von einer durchschnittlichen Lebensdauer $T = 90$ auszugehen, die große Schwankungsbreite aber mit $\alpha = 3$ entsprechend zu berücksichtigen.

Gipsprodukt		Mittlere Lebensdauer T	Ausfallverhalten a
Baugipse	Anhydritestrich	30	6
	Gipsestrich	30	6
	Putzmörtel	35	4
	Gipskleber	40	2
	Ansetzbinder	40	2
Gipsplatten	Vollgipsplatte	40	2
	Vollgipsplatte zur Wärmedämmung	40	2
	Gipsfaserplatte	40	2
	Gipskartonplatte	40	2
	Gipskartonplatte zur Wärmedämmung	40	2
Sonstige Anwendungen	Modellformengips in der Keramikindustrie	5	10
	Modellformengips nicht Keramikindustrie	1	10
	Medizinalgips	1	10
	Zement	90	3

Tabelle 5.6: Mittlere Verweilzeiten T und Ausfallverhalten a für Gipsprodukte

³⁷⁰ Bei den Modellformengipsen in anderen Industrien könnte auch ein Wert $T = 0,1$ oder noch kleiner eingesetzt werden, da die Verweilzeit fast nur fiktiv ist. Die Konkretisierung bringt jedoch keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn und wird nicht weiter verfolgt.

³⁷¹ vgl. etwa ITAS/ifib (1998, S. 235), Andrä et al. (1994, S. 107), Nicolai (1994, S. 31)

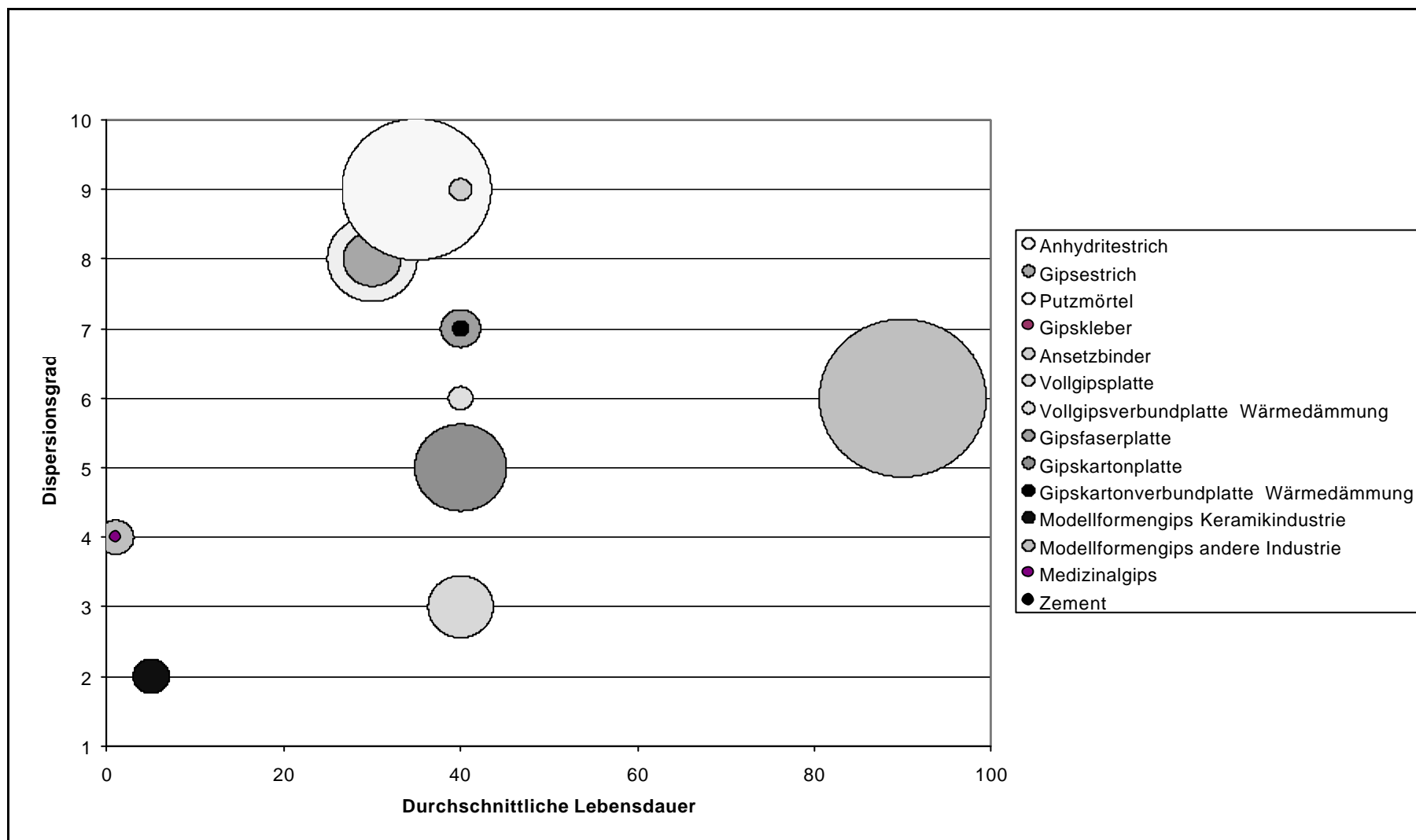


Abbildung 5.5: Verteilung der Gipsprodukte im Stofflager 1997 bezogen auf durchschnittliche Lebensdauer und Dispersionsgrad (Größe der Punkte im Verhältnis zu den Mengen im Stofflager)

Die obige Abbildung verdeutlicht, dass der überwiegende Teil der Gipsprodukte im Stofflager eine durchschnittliche Verweilzeit von ca. 30-40 Jahren besitzt. Große Ausnahme hiervon ist der Zement, der mit 80-90 Jahren etwa doppelt so lange im Bestand bleibt. Die Modellformen- und Medizinalgipse besitzen zwar eine sehr kurze Verweilzeit, sind aber mengenmäßig nicht bedeutsam. Bezogen auf den Dispersionsgrad zeigt sich eine Häufung im Bereich 8-9. Hierbei handelt es sich um die Baugipse, die sich allesamt durch sehr ungünstige Bewertungen hinsichtlich der Verbindungsstruktur, der Recyclingeignung und der Separierungskosten auszeichnen. Die Gruppe der Gipsplatten verteilt sich entlang der Achse des Dispersionsgrads relativ kontinuierlich auf Werte zwischen 3 und 7.

5.2.3 Die kohortenanalytische Darstellung des Bestands an Gipsprodukten

Im folgenden sollen die im Lager Bauwesen befindlichen Gipsprodukte in einer kohortenanalytischen Darstellung unter Zuhilfenahme der Verweilzeit abgebildet werden. Allerdings kann die gesamte Mächtigkeit des Instrumentariums der Kohortenanalyse solange nicht voll ausgeschöpft werden, solange der Abgang aus dem Bestand direkt mit dem Zufluss in den Bestand verknüpft und von diesem nicht unabhängig ist. Somit können zum Beispiel keine Alterseffekte beobachtet werden (da die Abnahme der Produkte einer Population mit fortschreitendem Alter ja eine direkte abhängige Größe des Zugangs ist). Kohorteneffekte könnten modelliert werden, indem die Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Geburtsperiode modifiziert würde, was jedoch aufgrund der unbefriedigenden Datenlage nur in sehr grobem Umfang sinnvoll ist. Auch Periodeneffekte können erst erkannt werden, wenn es gelingt, Abgänge direkt empirisch zu erfassen. Obwohl die meisten Erkenntnisse sich aufgrund einer Zeitreihenanalyse ergeben, bietet das Instrument der Kohortenanalyse einige interessante Erkenntnisse zum Zustand und zur Entwicklung des Bestands.

Folgende Annahmen liegen dieser Darstellung zu Grunde³⁷²:

1. Zur besseren Identifikation von Effekten bei der Kohortenanalyse wird für jedes Gipsprodukt eine eigene Subkohorte gebildet. Grundsätzlich wäre es auch denkbar, alle Produkte in einer Kohortendarstellung zusammenzufassen oder sie nach anderen Kriterien aufzuteilen (gleiche Überlebenswahrscheinlichkeit, gleicher Dispersionsgrad). Auch eine Aufteilung nach regionalen Gesichtspunkten ist im Hinblick auf eine Planung von Recyclingkapazitäten denkbar.
2. Der Bestand einer Kohorte B_{ji} in der Periode j wird ermittelt, indem die Überlebenswahrscheinlichkeit der zu Anfang in den Bestand eingebrachten Menge mit Alter 0 durch Verwendung der unter 5.2.1.3 berechneten Wahrscheinlichkeitsverteilung verknüpft wird.
3. Als Intervall für die Altersklassen und die Periodenklassen wird 5 Jahre gewählt.
4. Auf die Anwendung einer veränderlichen Überlebenswahrscheinlichkeit wird zunächst verzichtet³⁷³.
5. Der Bestand vor 1950 wird bei allen Gipsprodukten vereinfachend als 0 angenommen³⁷⁴.

³⁷² Zur theoretischen Fundierung der Kohortenanalyse vgl. Kapitel 4.2.2

³⁷³ Veränderliche Überlebenswahrscheinlichkeiten tragen der Tatsache Rechnung, dass technische Veränderungen oder veränderte Nutzungsbedingungen im Laufe der Zeit die mittlere Lebensdauer und den Schätzer für das Ausfallverhalten modifizieren.

³⁷⁴ Aus der Zeit vor 1950 sind zwar noch eine Reihe von Gipsprodukten, insbesondere Mörtel, vorhanden. Jedoch ist die Datenlage so unbefriedigend, dass auf eine detaillierte Erfassung verzichtet wird.

Am Beispiel der Gipskartonplatten wird im folgenden der Aufbau der Kohortenanalyse gezeigt und diskutiert, welche Erkenntnisse sich aus diesem Darstellungselement ableiten lassen³⁷⁵. Zugrunde gelegt wird die Produktion von Gipskartonplatten in Deutschland gemäß der Produktionsstatistik des Statistischen Bundesamts³⁷⁶. Erfasst werden Produktionen seit 1970, davor liegende Stückzahlen dürften eine vernachlässigbare Größe bilden. Ferner wird von Lagerhaltung abgesehen (d.h. Produktion = Absatz), was angesichts der betrachteten langen Zeiträume auch sinnvoll sein dürfte. Ferner wird von Außenhandel (Import und Export von Gipskartonplatten) abgesehen. Angesichts einer Größenordnung von etwa 200.000 t p.a. in den Jahren 1993-1997 jeweils für Import und Export dürfte auch dieser Effekt vernachlässigbar sein. Die resultierenden Zahlenwerte ergeben sich in ihrer Genauigkeit aufgrund der Anwendung der Weibull-Verteilung zur Bestimmung des Abgangs, sie stellen lediglich Größenordnungen dar und sollten auch nur als solche interpretiert werden.

Zur Darstellung einer Prognose für die weitere Entwicklung bis zum Jahr 2035 wurden die jährlichen Zuflüsse in den Baubereich mit dem Produktionswert von 1997 fortgeschrieben. Die Bestimmung dieser Werte unterliegt zwar den Nachfragegesetzmäßigkeiten (vgl. Kapitel 5.2.2.1), zur Demonstration der Aussagekraft der Kohortenanalyse sollte es jedoch hinreichend sein zu argumentieren, dass das gegenwärtige hohe Verbrauchsniveau kaum noch gesteigert werden dürfte. Letztendlich zeigen alle Prognosen über den Bedarf an Gebäuden in Richtung einer Stabilisierung der Werte auf hohem Niveau³⁷⁷.

³⁷⁵ Kohortenanalytische Darstellungen anderer Gipsprodukte finden sich in Anhang 3a

³⁷⁶ Zur Validität der Daten der Produktionsdaten des Statistischen Bundesamtes vgl. Kapitel 5.3. Auch diese Daten unterliegen Unsicherheiten, da zum einen die Abschneidegrenze von 20 Mitarbeitern bei der statistischen Erfassung gerade im Baubereich mit vielen Klein- und Kleinstbetrieben zu einer Unterschätzung führt, andererseits Unsicherheiten über die letztendliche Verwendung eines Produkts bestehen.

³⁷⁷ vgl. hierzu z.B. Behring et al. (1989), ITAS/ifib (1998), BBR (1998)

Periode Alter	1970-1974	1975-1979	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	Durchschnittl. Bestand
0	2.400.000	2.400.000	3.003.000	2.832.400	5.024.876	7.566.265	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	5.980.221
5		2.362.791	2.362.791	2.956.443	2.788.488	4.946.973	7.448.961	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	5.739.190
10			2.254.591	2.254.591	2.821.057	2.660.794	4.720.434	7.107.848	7.316.194	7.316.194	7.316.194	7.316.194	7.316.194	5.309.117
15				2.085.156	2.085.156	2.609.052	2.460.832	4.365.688	6.573.685	6.766.373	6.766.373	6.766.373	6.766.373	4.724.506
20					1.869.122	1.869.122	2.338.739	2.205.875	3.913.377	5.892.613	6.065.338	6.065.338	6.065.338	4.031.651
25						1.623.921	1.623.921	2.031.931	1.916.498	3.400.001	5.119.591	5.269.657	5.269.657	3.281.897
30							1.367.479	1.367.479	1.711.058	1.613.853	2.863.088	4.311.128	4.437.496	2.524.511
35								1.116.104	1.116.104	1.396.525	1.317.188	2.336.784	3.518.640	1.800.224
40									882.911	882.911	1.104.742	1.041.982	1.848.549	1.152.219
45										676.951	676.951	847.035	798.915	749.963
50											503.067	503.067	629.463	545.199
55												362.346	362.346	362.346
60													252.958	252.958
Summe	2.400.000	4.762.791	7.620.383	10.128.590	14.588.699	21.276.126	27.748.414	33.650.279	38.885.180	43.400.775	47.187.887	50.275.258	52.721.283	
Summe Abgänge		37.209	145.409	324.193	564.767	878.838	1.315.760	1.886.183	2.553.147	3.272.453	4.000.936	4.700.677	5.342.024	
Alters- durchschnitt	0,0	2,5	4,5	6,8	7,6	7,9	9,0	10,4	11,9	13,3	14,7	16,0	17,0	
% Abgänge an Zugängen	0,0%	1,6%	4,8%	11,4%	11,2%	11,6%	16,9%	24,2%	32,8%	42,0%	51,4%	60,4%	68,6%	
% Zugänge an Bestand	100,0%	50,4%	39,4%	28,0%	34,4%	35,6%	28,1%	23,1%	20,0%	17,9%	16,5%	15,5%	14,8%	
% Abgänge an Bestand	0,0%	0,8%	1,9%	3,2%	3,9%	4,1%	4,7%	5,6%	6,6%	7,5%	8,5%	9,3%	10,1%	
Bestands- wachstum		98,4%	60,0%	32,9%	44,0%	45,8%	30,4%	21,3%	15,6%	11,6%	8,7%	6,5%	4,9%	

Tabelle 5.7: Kohortenanalytische Darstellung des Bestands an Gipskartonplatten 1970-2035; Weibull-Verteilung $T=40$, $a = 2$
linearer Bestandszuwachs auf Basis 1997 = 1,56 Mio. t/a

Aus der kohortenanalytischen Darstellung des Bestands an Gipskartonplatten können einige Aussagen abgelesen werden:

- Der Bestand wächst zur Zeit rapide mit annähernd 50 %, beginnt sich aber ab dem Jahr 2000 zu verlangsamen. Der nochmalige Anstieg des Bestandswachstums nach der Periode 1985-1989 ist eigentlich untypisch für ein derartiges Produkt und im normalen Produktlebenszyklus nicht abzubilden. Er weist damit auf ein besonderes Ereignis hin (in diesem Fall Beginn der Rauchgasentschwefelung in Verbindung mit einer erhöhten Nachfrage aus den neuen Bundesländern).
- Die Zahl der jährlichen Abgänge wird sich in den nächsten 30 Jahren alle 10 Jahre annähernd verdoppeln und den sechsfachen Wert gegenüber heute erreichen.
- Zu- und Abgänge sind zur Zeit sehr weit voneinander entfernt, da die Zugänge die Abgänge um den Faktor 7-8 übersteigen. Erst langsam erfolgt eine Annäherung in Richtung eines Fließgleichgewichts, im Jahr 2030 stehen nach der Modellrechnung mehr als 2/3 der Zugänge auch Abgänge gegenüber. Setzt man effizientere Recyclingverfahren voraus (z.B. 60 % der Abgänge können wieder in den Kreislauf eingebracht werden), könnten somit im Jahr 2030 40-50 % der Zugänge aus abgegangenen Altprodukten gedeckt werden. Bezogen auf einen jährlichen Verbrauchswert von 1,5 Mio. t/a könnte damit mindestens 0,5 Mio. t/a an Frischmaterial eingespart werden.
- Aufgrund der Modellrechnung ist eine Stabilisierung des Bestands etwa ab dem Jahr 2040-2050 bei einem Wert von ca. 60 Mio. t zu erwarten. Die jährlichen Abgänge betragen dann bei einer mittleren Lebensdauer von 40 Jahren 2,5 % p.a. = 1,5 Mio. t, ein Faktor 8-10 gegenüber heute. Hierfür müssen technologische und logistische Vorkehrungen getroffen werden.
- Selbst im Jahr 2035 kann die Gipskartonplatte, obwohl dann schon fast 70 Jahre entwickelt, als junges Produkt bezeichnet werden, da der Altersdurchschnitt mit vermuteten 17 Jahren immer noch unter dem halben Wert der mittleren angenommenen Lebensdauer liegt.
- Am Verlauf der fett markierten Kohorte (Geburtsjahrgänge 1995-1999) wird die Struktur der angenommenen Verteilung deutlich: während in den ersten 15 Jahren nur einige wenige Produkte wieder den Bestand verlassen, steigen ab 2010 die Abgänge auf jährlich 100.000 – 150.000 t. Die halbe Kohorte ist etwa um das Jahr 2030 herum aus dem Bestand verschwunden.

Es muss jedoch nochmals auf die Probleme dieser Analyse hingewiesen werden:

- Es besteht eine große Abhängigkeit von den Parametern der Verteilungsfunktion zur Berechnung des Abgangs. Variiert man etwa den Parameter α zur Beschreibung des Ausfallverhaltens zu 4, ergibt sich für die letzte Periode ein um 5 Mio. t höherer Bestand sowie ein bis dahin niedrigerer jährlicher Abfallstrom.
- Der über die Nachfrage gesteuerte Zugang spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. Sinkt der jährliche Zufluss ab 1997 z.B. von 1,54 Mio. t/a auf 1,0 Mio. t/a, beträgt der Bestand in der letzten Periode nur noch 36 Mio. t, auch der Abgang reduziert sich auf 4 Mio. t in dieser Periode. Das Wachstum des Bestands ist dann fast zum Stillstand gekommen.

5.2.4 Die Größe des Gipslagers und der Gipsströme

Im folgenden werden der Top-Down-Ansatz und der Bottom-Up-Ansatz verwendet, um mit Hilfe einer Güterbilanz die Quellen und Senken sowie der Lagerbestand von Gips im System Bauwesen in Oberösterreich zu untersuchen. Als räumliche Grenze wird das Bundesland Oberösterreich sowie als zeitlicher Betrachtungshorizont bei der Bestimmung der Fluxes Daten aus dem Zeitraum 1990-1995 herangezogen (sofern verfügbar, wird auf die jeweils neuesten Daten zurückgegriffen).

Die Beschränkung auf Oberösterreich hat folgende Vorteile:

- es handelt sich um ein überschaubares Gebiet (ca. 1,4 Mio. Einwohner, 12.000 km²)
- es liegen bereits Ergebnisse aus einer umfangreichen Untersuchung über die Güterbilanz der Bauwirtschaft in Oberösterreich vor³⁷⁸
- Daten und Ergebnisse aus Oberösterreich können mit anderen Erhebungen verglichen werden³⁷⁹

Eine Übertragung der Erkenntnisse auf andere Bilanzräume in Mitteleuropa ist aufgrund der Ähnlichkeit der Rahmenbedingungen leicht möglich.

Zur Bestimmung des Inputs in das Bauwesen werden Rohstoffe und (halb-)fertige Produkte herangezogen, die nach der amtlichen Statistik ins Bauwesen gelangt sind. Diese Daten werden auf Güterebene durch Verbandserhebungen und Abschätzungen aus anderen Untersuchungen³⁸⁰ (insbesondere BUWAL-Studie aus der Schweiz) validiert. Somit folgt die Input-Bestimmung im wesentlichen dem Top-Down-Verfahren.

Zur Bestimmung des Lagers kommen Ergebnisse einer Studie über Güterflüsse im Bauwesen Oberösterreichs³⁸¹, Abschätzungen über die Bestandsanzahl bzw. -Fläche von Hochbauten sowie Validierungen aufgrund von prozentualen Bestandsangaben aus anderen Untersuchungsbereichen zum Einsatz³⁸² wurden Faktoren aus der Literatur sowie eigene Annahmen herangezogen, insbesondere Verhältnisse zwischen vergangenen und gegenwärtigen Verbrauchsstrukturen. Hier folgt die Güterbilanzierung dem Bottom-Up-Ansatz.

Die Quantifizierung der Abfallmenge erfolgt aufgrund der in BRIO ermittelten Abfallmenge aus dem Hochbau. Umbau- und Abbruchschutt wurden aufgrund des bei Gips kürzeren Lebenszyklus von Bauteilen getrennt berücksichtigt. Die Unterscheidung von Umbau- und Abbruchschutt wird auch bei der Zuordnung auf einzelne Behandlungswege in der Abfallwirtschaft aufgegriffen, da sich die Gipskonzentrationen in den einzelnen Fraktionen unterscheiden.

Allgemein gilt, dass die Qualität der Daten nur beim Input als ausreichend bezeichnet werden kann, während bei der Bestimmung des Lagers und insbesondere bei der Ermittlung der Abfallmengen und Behandlungswege die Datenlage ungenügend ist, so dass die genannten Werte lediglich Abschätzungen zur Bestimmung der Größenordnungen darstellen.

³⁷⁸ Glenck et al. (1996)

³⁷⁹ Eine Auswahl der Vergleichsstudien findet sich in Kapitel 4.3.2

³⁸⁰ BUWAL (1995) für die Schweiz, Lampert et al. (1996) für Wien

³⁸¹ Glenck et al. (1996) für die Güterbilanz im Bauwesen von Oberösterreich (BRIO)

1. Zur Ermittlung des Güterflusses von Gips im Bauwesen wurden folgende Datenquellen herangezogen:
 - Input: amtliche Produktionsstatistik, BUWAL-Daten für die Schweiz
 - Lager: BRIO-Abschätzung, ITAS/ifib-Daten für Deutschland, Wohnungsstatistik
 - Output: BRIO-Abschätzung, ITAS/ifib-Daten für Deutschland, diverse Bauschuttanalysen
2. Bei der Verwendung von Datenanalysen aus Österreich bzw. aus anderen Ländern wurden Umrechnungsfaktoren im Verhältnis der Bevölkerungszahl angenommen.
 - OÖ = 18 - 25 % von Österreich
 - OÖ = 20 % von Schweiz
 - OÖ = 2 % von Deutschland
3. Bei der Berechnung des Gipsanteils in verschiedenen, aktuell verwendeten Baustoffgruppen wurden folgende Annahmen getroffen³⁸³:
 - Zementanteil im Beton: 11-15 %
 - Gipsanteil im Zement: 3-6 %
 - Gipsanteil im Beton: 0,35-0,9 %
 - Gipsanteil im Anhydritestrich: 40-80 %
 - Gipsanteil in Gipskartonplatten: 70-90 %
 - Gipsanteil in Gipsplatten: 95 %
 - Anteil Anhydritestrich an allen Estrichen: 10 %
4. Bei der Berechnung der Zusammensetzung des Lagers an Gipsprodukten werden folgende Annahmen zu Grunde gelegt³⁸⁴:
 - Anteil Anhydritestrich an allen Estrichen: 5 %
5. Zur Ermittlung der Mengen an Gips im Bauschutt wurden folgende Annahmen getroffen³⁸⁵:
 - Gipsanteil in der Bauschuttkategorie Putz/Mörtel: 15 %
 - Gipsanteil in der Bauschuttkategorie Kalk/Gips/Mörtel: 10 %
 - Anteil Putz und Mörtel am gesamten Bauschutt: 5,7 % - 9,2 %
 - Anteil Kalk/Gips/Mörtel am gesamten Bauschutt: 30 %
 - Betonanteil im Hochbauabbruch: 30 %
 - Betonanteil im Tiefbauabbruch: 50 %
 - Zementanteil im Hochbauabbruch: 1,8 %

³⁸² ITAS/ifib (1998) für Deutschland

³⁸³ Annahmen aus: Technologie der Baustoffe; BUWAL (1995)

³⁸⁴ vgl. BUWAL (1995)

³⁸⁵ vgl. ITAS/ifib (1998), Glenck et al. (1996); Schachermayer et al. (1997)

- Gipsanteil außerhalb der Kategorien Putz/Mörtel und Beton/Zement: 0 %³⁸⁶
 - Anteil des auf die Deponie verbrachten Gips aus Umbaumaßnahmen: 15 %
 - Anteil des im Hausmüll abtransportierten Gips aus Umbaumaßnahmen: 5 %³⁸⁷
 - 30 % des Bauschutts gelangt in die Feinfraktion 0/8 mm bzw. 0/16 mm
 - 70-90 % des Gipses reichern sich in der Feinfraktion an³⁸⁸
 - 60 % der Feinfraktion können wiederverwendet werden, 40 % müssen deponiert werden³⁸⁹
 - Gips, der sich nicht in der Feinfraktion anreichert, kann komplett wiederverwertet werden
6. In den Lagern der Abfallwirtschaft werden folgende Schätzungen für den Gipsanteil angestellt³⁹⁰:
- Gipsanteil in Bauschuttdeponien (hauptsächlich Putz- und Mörtelreste): 1-1,5 %
 - Gipsanteil in der sonstigen Entsorgung: 1-2 %³⁹¹

Input ins Bauwesen

In das System Bauwirtschaft Oberösterreich werden 135.000 - 180.000 Mg/a an Gips eingebracht, wovon der weitaus größte Teil in den Hochbau fließt³⁹².

Gips im Putz, Estrichmassen sowie Gipskleber: 40.000 - 55.000 Mg/a

Gips im Zement/Beton: 40.000 - 50.000 Mg/a

Gips in Platten: 55.000 - 75.000 Mg/a

Summe Input: **135.000 - 180.000 Mg/a**

Bezogen auf die gesamte in den Hochbau eingebrachte Masse in Höhe von rund 12 Mio. Mg/a entspricht dies einem Anteil von 1 - 1,5 %. Der Einsatz verteilt sich dabei in etwa gleichmäßig auf die drei Produktgruppen Putz/Mörtel, Platten und Zement. Auffällig ist insbesondere ein hohes Inputwachstum im Bereich der Gipsplatten und Gipskartonplatten, bei denen sich die Produktion allein zwischen 1988 und 1995 annähernd verdoppelt hat. Da alle Arten von Gipsplatten im Innenbereich eingesetzt werden und somit eine gegenüber Beton deutlich verkürzte Lebensdauer besitzen, müssen Konzepte entwickelt werden, was mit dieser „Plattenschwemme“ in Zukunft geschehen soll.

³⁸⁶ Da für Gips aus Platten keine Verwertungsoptionen bestehen, wird angenommen, dass dieser nicht an Sortieranlagen angeliefert und statt dessen deponiert oder der sonstigen Entsorgung zugeführt wird

³⁸⁷ Die Annahme, dass 5 % des Gipses, der bei Umbaumaßnahmen anfällt, mit dem Hausmüll abtransportiert wird, lässt sich insofern plausibel machen, wenn man überlegt, dass beim Umbau abgefallener Putz zusammengekehrt und mit der Müllabfuhr abtransportiert wird

³⁸⁸ vgl. Nicolai (1994, S. 31)

³⁸⁹ 40 % müssen deponiert werden, da die Anreicherung von Störstoffen höher ist, so dass eine Verwertung nur eingeschränkt möglich ist. Darüber hinaus spiegelt der Faktor 0,12 (30 % in Feinfraktion * 40 % Deponierung) das Verhältnis aus der BRIO-Studie wider (Input in Aufbereitungsanlagen 0,46 Mio. Mg, zu deponierende Menge 0,06 Mio. Mg = 13 %) (Glenck et al., 1996, S. 104)

³⁹⁰ vgl. Glenck et al. (1996)

³⁹¹ Der Gipsanteil in der Sonstigen Entsorgung ist wegen der Gipsplatten höher als in Bauschuttdeponien

³⁹² Nur über den Pfad Zement->Beton gelangt Gips in den Tiefbau. Diese Menge wird jedoch vernachlässigt

Lager im Bauwesen

Die Bestimmung des Lagers an Gips im Bauwesen orientiert sich an der Abschätzung der Massen gipshaltiger Produkte im Bauwesen, insbesondere im Hochbau. Die gefundenen Resultate weisen große Bandbreiten auf, die die in der Güterbilanz gefundenen Bandbreiten bei der Abschätzung der Masse im Lager Bauwesen widerspiegeln³⁹³. Dennoch ergibt sich in Bezug auf beide Extremwerte ein relativ konstanter Anteil an Gips im Bestand des Hochbaus von 1,3 - 1,4 % (1,25 Mio. Mg Gips bei einem angenommenen Baulager von 95 Mio. Mg; 6 Mio. Mg bei einem angenommenen Baulager von 435 Mio. Mg). Die Rechnungen für Oberösterreich zeigen folgende Ergebnisse:

Gips im Putz:	400.000 - 2.400.000 Mg
Gips in Estrichmassen:	70.000 - 150.000 Mg
Gips als Montagegips:	20.000 - 160.000 Mg
Gips in Gipskartonplatten:	90.000 Mg - 400.000 Mg
Gips in Gipsbauplatten:	270.000 - 1.200.000 Mg
Gips im Zement:	400.000 - 1.700.000 Mg
<u>Gipsanteil in Fliesenklebern:</u>	<u>nicht abgeschätzt, vermutlich klein</u>
Summe Lager:	1.250.000 - 6.000.000 Mg

Aufgrund der überschlägigen Berechnung der gesamten Input- und Outputströme des Gipses ins Lager Bauwesen ergibt sich mit einer Gesamtmasse von 4,4 Mio. Mg ein Wert, der im oberen Bereich der abgeschätzten Bandbreite liegt. Der jährliche Input ins Bauwesen beträgt somit zwischen 3 und 14 % am Gesamtbestand. Abzüglich des Outputs aus dem Bauwesen ergibt sich eine jährliche Zunahme des Gipslagers von 3 bis 12 %. Dieser Wert liegt somit rund 50 % über dem Wachstum des Gesamtlagers³⁹⁴.

Output aus dem Bauwesen

Die Bestimmung des Outputs an Gips aus dem Bauwesen orientiert sich im wesentlichen an den gesamten Output-Massen aus dem Lager Bauwesen sowie an der Betrachtung der vermutlich ausgebauten gipshaltigen Produkte. Dabei wird besonders der Umstand berücksichtigt, dass gipshaltige Produkte durch ihre ausschließliche Verwendung im Innenbereich besonders bei Umbauarbeiten anfallen. Die Rechnungen für Oberösterreich zeigen folgende Ergebnisse:

Gips im Putz, Estrichmassen sowie Gipskleber:	10.000 - 41.000 Mg/a
Gips in Platten:	3.000 - 15.000 Mg/a
<u>Gips im Zement/Beton:</u>	<u>1.500 - 5.000 Mg/a</u>
Summe Output:	15.000 - 60.000 Mg/a

Der Anteil des Outputs an Gips am Inputstrom liegt zwischen 10 und 30 % und damit etwas über den Werten, die bei der Betrachtung aller Baumaterialien als Verhältnis zwischen Input und Output gefunden werden. Dies könnte auf die um den Faktor 2-3 mal höhere Austauschhäufigkeit gipshaltiger Produkte aus dem Gebäudeinnenbereich zurückzuführen sein³⁹⁵.

³⁹³ vgl. Glenck et al. (1996, S. 89-91)

³⁹⁴ Wachstum des Gesamtlagers: 2-7 % p.a. (Glenck et al., 1996, S. ii)

³⁹⁵ vgl. Andrä et al. (1994, S. 108), die für Innenausbaumaterialien eine Lebensdauer von 30 Jahren annehmen, während sie für tragende Konstruktionen eine Lebensdauer von 80 Jahren schätzen.

Der aus dem Lager Bauwesen ausgetragene Gips wird in der Abfallwirtschaft in unterschiedlichen Zweigen behandelt. Die Daten, welche Gipsmassen konkret in welchen Zweig gehen, sind sehr lückenhaft, obwohl ihnen wegen der besonderen Eigenschaften des im Gips enthaltenen Sulfats eine besondere Bedeutung zukommt. So sind aufbereitete mineralische Baurestmassen, die als Zuschlagstoff bei der Betonherstellung vorgesehen sind, nicht mehr verwendbar, wenn der Sulfatanteil zu groß wird, da das Gipstreiben die Festigkeit der entstehenden Betonprodukte gefährdet. Andererseits kann auf Deponien mit einem hohen Anteil an Gips durch Vermischung mit Wasser eine verstärkte Auslaugung von Schadstoffen eintreten, da die Sulfat-Ionen andere Ionen im Bauschuttgemenge verdrängen, welche wiederum ins Grundwasser gelangen können³⁹⁶. Dieser Effekt ist umso relevanter, je ungesicherter die Deponierung erfolgt, weswegen dieser Sachverhalt aufgrund der großen Masse, die der sonstigen Entsorgung zugerechnet wird, eine besondere Beachtung erfordert.

Folgende Flüsse von Gips in der Abfallwirtschaft werden abgeschätzt³⁹⁷:

Anlieferung an Aufbereitungsanlagen:	2.300 - 3.700 Mg/a
Wiederverwertbarer Gips aus Aufbereitungsanlagen:	1.700 - 2.300 Mg/a
Zu deponierender Gips aus Aufbereitungsanlagen:	0 – 2.000 Mg/a
Zugang auf Bauschuttdeponien:	1.500 - 5.000 Mg/a
Abtransport mit dem Hausmüll:	500 - 1.500 Mg/a
Sonstige Verwertung und Entsorgung:	10.000 - 50.000 Mg/a

Vorwiegend Abbruchschutt mit einem aufgrund der fehlenden Gipsplatten geringeren Gipsgehalt erreicht die Bauschuttsortieranlagen (2.300 - 3.700 Mg/a in einer angelieferten Gesamtmasse von 220.000 Mg/a). Gips konzentriert sich hauptsächlich in den Feinfraktionen und führt dort zu einem Gipsgehalt von 3 - 5 %, womit eine Verwendung als Zuschlagstoff für Beton ausgeschlossen ist. Die Eignung dieses Materials als Hinterfüllung im Tiefbau bedarf einer kritischen Untersuchung hinsichtlich der Mobilisierbarkeit von Stoffen.

Der Anteil des wiederverwerteten Gipses beträgt gerade 1 % am Gesamtinput an Gips ins Bauwesen. Da der Gips jedoch im mineralischen Materialgemisch gespeichert ist und entweder als Tiefbauhinterfüllung oder als Betonzuschlag eingesetzt wird, beträgt die Entlastung des Inputs durch Recycling zur Zeit praktisch 0 %. Besondere Beachtung verdienen hierbei die Gipsplatten, die zwar als relativ homogenes Material vorliegen, für die aber bislang keine Verwertungskonzepte existieren. Betrachtet man den rasanten Lageraufbau dieser Produkte (jährlicher Lagerzuwachs 6 - 20 %) und die Lebensdauer dieser Produkte (ca. 30 Jahre), ist hier bereits in nächster Zukunft mit einem Anschwellen dieser Abfallströme zu rechnen.

Der hohe Wert für die unbekannte Entsorgung könnte zum Teil auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass Gipsabfälle vermehrt beim Umbau von Gebäuden entstehen, bei dem die Tendenz zur unsachgemäßen Entsorgung aufgrund der jeweils geringeren Mengen und Kontrollierbarkeit vermutlich höher liegt als beim Abbruch von Gebäuden.

Das Gipslager in Baurestmassendeponien wird auf 150.000 - 200.000 Mg, das in der sonstigen Entsorgung auf 0,3 - 3,4 Mio. Mg geschätzt. Der Ansatz über kumulierte Outputströme liefert rund 1,2 Mio. Mg. Dieser Wert liegt innerhalb der oben gefundenen Bandbreite.

³⁹⁶ vgl. Kapitel 5.1.3

³⁹⁷ Schätzung aufgrund von Daten aus Glenck et al. (1996, S. 104 ff.)

Verglichen mit den Relationen aus der BRIO-Studie zeigen sich bei der gefundenen Verteilung der Baurestmassen auf die einzelnen Zweige Unterschiede bei der Behandlung von Gips. So ist der Massenstrom der deponierten Gipsmassen im Vergleich zur BRIO-Studie größer als derjenige, der an Aufbereitungsanlagen geliefert wird. Dies ist zum einen auf die Nicht-Verwertbarkeit von Gipsplatten zurückzuführen, zum anderen zeichnet hier der hohe Anteil von Gips im Umbauschutt verantwortlich, der nicht an Aufbereitungsanlagen gelangt. Für den Gips, der mit der Müllabfuhr abtransportiert wird, kann analog der hohe Anteil im Umbauschutt als Erklärung herangezogen werden, obwohl das Verhältnis zum Massenstrom in die Aufbereitungsanlage (ca. 1:2) etwa in der gleichen Größenordnung liegt wie in der BRIO-Studie bei alleiniger Betrachtung der Baurestmassen aus dem Hochbau (0,1 Mio. Mg über Müllabfuhr : 0,22 Mio. Mg in Aufbereitungsanlagen).

Ebenfalls mit der BRIO-Studie vergleichbar ist das Ausmaß der sonstigen Entsorgung. Vom gesamten in die Abfallwirtschaft gelangenden Outputstrom an Gips kann der Verbleib von 5.000 - 10.000 Mg/a Gips, entsprechend 15 - 30 % der insgesamt anfallenden Gipsrestmassen, nachvollzogen werden. In der BRIO-Studie kann die Behandlung von etwa 0,4 Mio. Mg an Baurestmassen aus dem Hochbau identifiziert werden, bezogen auf einen Gesamtanfall von 1 - 2,6 Mio. Mg/a sind dies 15 - 40 %.

Die Dynamik der Lager im Bauwesen und in den Deponien ist in etwa ähnlich, wobei analog zur BRIO-Studie auffällt, dass das Lager der sonstigen Entsorgung schneller wächst als der registrierte Deponiekörper. Die Größe des Gips-Deponiekörpers entspricht etwa 35 - 60 % des Lagers an Gips im Bauwesen und liegt damit über den Werten in BRIO, was durch die höhere Austauschhäufigkeit von gipshaltigen Produkten bedingt durch ihre kürzere Produktlebensdauer erklärt werden kann.

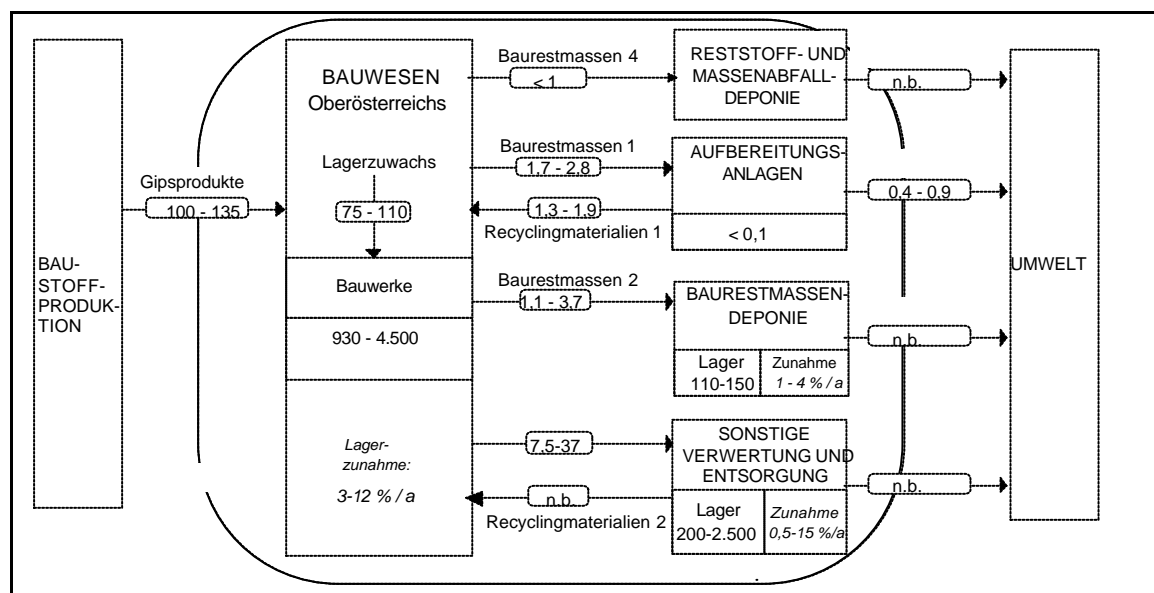


Abbildung 5.6: Gipsfluss im Bauwesen Oberösterreichs, Angaben in 1.000 Mg bzw. 1.000 Mg/a³⁹⁸

³⁹⁸ Zur Ermittlung der Zahlenwerte vgl. Anhang 2

Fazit zum Stofffluss von Gips

Aus den Überlegungen lassen sich folgende Feststellungen ableiten:

- Der Gipsinput ins Bauwesen schwillt zur Zeit stark an. Dies liegt vermutlich an dem Angebot an synthetischem Gips und dem Ersatz anderer Baustoffe durch Gips (z.B. Verdrängung des Mauerwerksbau und der Verwendung von Gasbeton bei der Errichtung von Innenwänden sowie durch zunehmende Verwendung von gipsgebundenem Putz- und Estrichmaterial).
- Aufgrund der ausschließlich auf den Innenausbau im Hochbau bezogenen Verwendung von Gips dürften diffuse Gipsemissionen während der Nutzungsphase als gering anzunehmen sein.
- Der Gipsstrom im Bauwesen befindet sich nicht im Fließgleichgewicht. Der Eintrag von Gips ins Lager Bauwesen ist 3 bis 6 mal höher als der Output aus dem Bauwesen.
- Das Lager an Gips im Bauwesen verdoppelt sich innerhalb von 10 Jahren. Die Wachstumsrate des Deponiekörpers an Gips ist zur Zeit halb so groß. Sollten die Gipsströme ins Lager Bauwesen weiterhin zunehmen, ist zukünftig mit einem beschleunigten Gipsanfall im Output zu rechnen.
- Die Struktur des Gipslagers im Bauwesen verändert sich zugunsten einer Anwendung in Gipsplatten und Gipskartonplatten. Für diese zur Zeit im Abfallstrom im Verhältnis zum Input und zum Lager noch unterrepräsentierten Güter sollten Verarbeitungskonzepte entwickelt werden, da sie ansonsten deponiert werden müssen. Solche Konzepte bestehen seitens der Hersteller gegenwärtig nicht³⁹⁹.
- Die aus Aufbereitungsanlagen rezyklierten Gipsmengen stellen rund 1 % des Gipsinputs dar. Dieses Material wird jedoch nicht zur ursprünglichen Verwendung eingesetzt, sondern, da es in Verbindung mit anderen mineralischen Materialien vorliegt, in anderen Anwendungen. Die reale Substitutionsmenge liegt also bei 0 % des Inputs. In Zukunft sollte untersucht werden, welchen Effekt der durch den Gips bewirkte zusätzliche Schwefeleintrag in die anderen Verwendungen besitzt (insbesondere bei Verfüllungen im Tiefbau).
- Da die Sulfate von rezykliertem Gips aus Aufbereitungsanlagen die Betonqualität maßgeblich beeinflussen, ist eine Erhöhung des Gipsanteils in Baurestmassen mit einer Einschränkung des Recycling verbunden. Daher wird eine getrennte Rückholung des Gipses (selektiver Rückbau) empfohlen. Sollte sich der eingebaute Gips als nicht rückholbar erweisen, sollte der Einsatz vermieden werden.
- Bezüglich der Gipsflüsse von der Abfallwirtschaft in die Umwelt (insbesondere die Sulfatflüsse ins Umweltmedium Wasser) bestehen noch große Unsicherheiten, da ihr Ausmaß wesentlich vom lokalen Chemismus abhängt (z.B. lokales Gipsüberangebot).
- Das Lager an Gips im Bauwesen wächst derzeit mit etwa 3 - 12 % jährlich (Eintrag ins Bauwesen ca. 3 - 14 %, Austrag ca. 1 %). Der registrierte Deponiekörper an Gips wächst jährlich um ca. 1 - 4 %, wobei dies aufgrund der unbekannten Masse an Gips in Depo-nien und den hohen Unsicherheiten bezüglich des Abfallanfalls und der Verwertungs-

³⁹⁹ vgl. mündliche Auskunft von Dr. Kollinger, Verband der Stein und keramischen Industrie Österreich, 25.02.1997

ströme nur eine grobe Annäherung darstellt. Demgegenüber scheint das Lager der nicht registrierten Abfallmassen eine höhere Dynamik aufzuweisen, die in einer Größenordnung zwischen 1 und 14 % pro Jahr liegt. Sollten die Gipsströme ins Lager Bauwesen weiterhin überproportional zunehmen, ist mit einer beschleunigten Aufstockung des Lagers zu rechnen.

- Es sollte detaillierter untersucht werden, für welche Stoffe der synthetische Gips aus der Rauchgasreinigung als Trägermaterial für die Einschleusung ins Bauwesen dient. Untersuchungen zeigen, dass die Konzentrationen der Stoffe Quecksilber und Selen im REA-Gips um ein bis zwei Größenordnungen über den Konzentrationen im Naturgips liegen⁴⁰⁰. Neben der Frage, welchen Weg diese Stoffe im System Bauwirtschaft nehmen, muss die Relevanz dieses Eintrags im Verhältnis zum gesamten Quecksilber- und Selenstofffluss in der Anthroposphäre untersucht werden.
- In der heutigen Grenzwertregelung bleiben die Stofffrachten nicht berücksichtigt und die Ausnahmen zahlreich. Das Verdünnungspotenzial auf lokaler Ebene ist nicht bekannt.

5.2.5 Exkurs: Schwefelbilanz in Oberösterreich

Um die Bedeutung der durch Gips hervorgerufenen Schwefelflüsse im Bauwesen beurteilen zu können, wird im folgenden eine überschlägige Schwefelbilanz für Bauprodukte erstellt und anschließend mit anderen anthroposphärischen Flüssen verglichen. Diese Darstellung soll zeigen, dass die Vorgehensweise zur Bestimmung von Stoffflüssen und Stofflagern auch geeignet ist, um Aussagen über einzelne Elemente abzuleiten. Ferner werden auf der Ebene des Elements Schwefel Systemvergleiche der Baurestmassen mit der Abfallwirtschaft, der restlichen Bauwirtschaft und der sonstigen Anthroposphäre angestellt, um die Bedeutung der Baurestmassen für den anthropogenen Schwefelfluss hervorzuheben.

Neben Gips als wesentlichem Schwefelträger fällt in der nachfolgenden Tabelle vor allem Bitumen mit einem Schwefelgehalt von 3 - 5 % auf. Der Absatz von Bitumen in Österreich betrug 1992 rund 300.000 Mg (Annahme Oberösterreich: 60.000 Mg), etwa 30 - 40 % des Gipsinputs. Da der Schwefelanteil im Bitumen rund 20 % des Schwefelanteils in Gips beträgt, trägt Bitumen mit maximal 10 % zum Schwefelinput ins Bauwesen bei.

Eine Reihe chemischer Zusatzprodukte auf Schwefelbasis (insbesondere Sulfate, Anionenseide, Sulfonate und Sulfonsäuren) wird derzeit im Bauwesen eingesetzt⁴⁰¹. Hierzu gehören Bariumsulfat, Ammoniumsulfat, Aluminiumsulfat, Alkylethersulfat, Cadmiumsulfoselenid, Kupfersulfat, Natriumsulfat, Magnesiumsulfat, Zinksulfid und andere. Der überwiegende Teil der Anwendungen erfolgt als Betonzusatzmittel und als Zusatzstoff für Mörtel. Im Vergleich zu den wesentlichen Baustoffträgern liegt ihr Massenanteil jedoch deutlich unter 1 Massen-%, weswegen auf eine explizite Berücksichtigung verzichtet wird.

⁴⁰⁰ Schachermayer et al. (1995b, S.34); Beckert et al. (1991, S. 51)

⁴⁰¹ vgl. BUWAL (1995)

Bauprodukt	min. S-Gehalt (mg/kg)	max. S-Gehalt (mg/kg)	Input ins Bauwesen (kg/EW.a)	S-Fluss ins Bauwesen (min.)	S-Fluss ins Bauwesen (max.)
Beton, Gasbeton	1.000	1.500	2.800	3	4
Holz (Spanplatten, Holzspäne)	1.900	2.000	101	0,2	0,2
Kunststoffe	1.500	3.700	3	0,004	0,009
Stahl (Bau-, Bewehrungsstahl)	200	500	71	0,01	0,04
Bitumen	30.000	50.000	45	1,3	2,3
Gips	186.000	235.000	77	14	18
Glas	900	900	15	0,01	0,01
Kies, Sand, Schotter, Splitt, Stein	160	510	7.600	1,2	3,9
Zement	10.000	16.000	400	4	6
insgesamt			!Syntaxfehler,)11.112	24	34

Tabelle 5.8 Schwefelgehalte in Bauprodukten in mg/kg⁴⁰².

Weitere Schwefelträger im Bauwesen sind Calciumsulfid (CaS) in Hochofenschlacken sowie Sulfit (SO₃) in Steinkohlenflugaschen, die beide zur Herstellung von Zement eingesetzt werden. Der SO₃-Anteil in Steinkohlenflugaschen ist mit 0,5 - 3 Massen-% nicht vernachlässigbar, allerdings ist der Schwefelbeitrag, der über diesen Pfad im Bauwesen bewegt wird, aufgrund der geringen Verwendung von Steinkohlenflugaschen als klein gegenüber dem Beitrag durch Gips zu bezeichnen. Der hauptsächliche Schwefelanteil im Zement stammt von der Gipszugabe als Abbindeverzögerer.

Ziele der Schwefelbilanz

Der Schwefelfluss im Bauwesen wird mit Hilfe einer Stoffflussanalyse abgeschätzt. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Stofffrachten und die abfallwirtschaftlichen Senken von Schwefel zu bestimmen und zu beurteilen. Die Beurteilung der Schwefelflüsse in der Abfallwirtschaft erfolgt dabei auf 4 Ebenen⁴⁰³:

1. Bestandsaufnahme des Schwefelflusses im Bauwesen
2. Vergleich des S-Flusses in Baurestmassen mit dem S-Fluss in der Abfallwirtschaft
3. Vergleich des S-Flusses in Baurestmassen mit dem S-Fluss in der Bauwirtschaft
4. Vergleich des S-Flusses in Baurestmassen mit dem S-Fluss in der Anthroposphäre

⁴⁰² Die jährlichen Inputflüsse ins Bauwesen sind mittlere Werte aus der Produktionsstatistik (für Bitumen geschätzt aufgrund der Verbrauchsdaten in Gesamtösterreich, für Gips aufgrund der Inputmassen für Putz und Platten aus der Güterbilanz)

Ziel ist es, diejenigen Flüsse zu identifizieren, bei denen eine Verletzung abfallwirtschaftlicher Ziele vermutet werden kann. Mit Hilfe der Analyse sollen ferner Indizien dafür aufgezeigt werden, ob eine Festlegung von Grenzwerten für die Einbringung von Schwefel in Deponien sinnvoll erscheint.

Nicht zuletzt soll die Stoffflussanalyse für Schwefel die Grundlage für die Ableitung von Maßnahmen und deren Bewertung aufgrund der Überschaubarkeit des Systems Gips/Schwefel darstellen. So kann mit Hilfe einer dynamischen Lagerbestandsmodellierung der Einfluss steuernder Maßnahmen im Produktbereich (Gips) auf den Stoffbereich (Schwefel) untersucht werden.

Auf einen Vergleich des Schwefelflusses und insbesondere der Schwefellager in der Anthroposphäre mit denen in der Umwelt wird verzichtet. So befindet sich allein im Meerwasser eine riesige Menge an Schwefel. Ausgehend von einer Wassermenge von $1413 \cdot 10^{21}$ g in den Ozeanen und einer Schwefelkonzentration von 0,9 g/l ergibt sich unter der Annahme, dass ein Liter Meerwasser 1000 g wiegt, eine Menge von etwa $1,27 \cdot 10^{21}$ g an Schwefel entsprechend 1270 Billionen t Schwefel bzw., bei einer Weltbevölkerung von 6 Milliarden Menschen, rund 200.000 t / Einwohner⁴⁰⁴. Die in der Anthroposphäre gespeicherte Schwefelmenge, insbesondere im Bauwesen, ist demgegenüber mit etwa 1 t / Einwohner sehr gering.

Methoden und Annahmen der Schwefelbilanz

Zur Abschätzung der Schwefelflüsse im Bauwesen werden verschiedene Ansätze verwendet, um somit eine Validierung der erhaltenen Resultate zu ermöglichen.

1. Input-Fracht in Baumaterialien:

- Verknüpfung von Baustoffgruppen und Bodenmaterial mit typischen Schwefelgehalten
- Berechnung mit Hilfe der in der Güterbilanz Gips ermittelten Werte

2. Lager im Bauwesen:

- Berechnung aufgrund einer mittleren Stoffkonzentration aus den Inputströmen
- Berechnung mit Hilfe der in der Güterbilanz Gips ermittelten Werte
- Berechnung mit Hilfe einer überschlägigen Input-Output-Analyse für Gipsprodukte
- Abschätzung aufgrund einer Baustoffklassifizierung des Lagers im Hochbau für Deutschland und Verknüpfung mit typischen Schwefelgehalten

3. Output aus dem Bauwesen und Flüsse in der Abfallwirtschaft:

- Berechnung aufgrund von insgesamt angefallenen Baurestmassen/Bodenaushub und Schwefelkonzentrationen sowie Aufteilung auf einzelne Zweige der Abfallwirtschaft nach den „Transferkoeffizienten“ aus der BRIO-Studie
- Berechnung mit Hilfe der in der Güterbilanz Gips ermittelten Werte und Bearbeitungs-zweige

⁴⁰³ vgl. Kapitel 4.3.3

⁴⁰⁴ vgl. Mason/Moore (1985, S. 238)

4. Lager der Deponie:

- Berechnung des Lagers mit Hilfe von Stoffkonzentrationen für Bauschutt/ Bodenaushub, verknüpft mit den in der BRIO-Studie abgeschätzten Lagerkörpermassen
- Abschätzung der kumulierten Output-Ströme von Gips

5. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Die brennbaren Baumaterialien Holz und Kunststoff werden einer thermischen Behandlung zugeführt. 20 % des Schwefels verbleiben in der Asche, während 80 % in der Rauchgasreinigung zurückgehalten werden⁴⁰⁵.
- Der Schwefelanteil der Massenbaustoffe Sand, Kies, Schotter, Steine wird mit dem typischen Erdkrustenanteil angenommen (gleicher Wert wie für Bodenmaterial).
- Der Schwefelanteil in Holz wird um 10-20 % größer angenommen als in der Literatur angegeben, da Holzschutzmittel häufig größere Mengen an sulfidischen Verbindungen enthalten⁴⁰⁶.
- Bei der Schwefelfracht, die bei der Bauschuttaufbereitung ins Abwasser gelangt, wird angenommen, dass 50 % der Massen nass aufbereitet werden und hier der maximale Transferkoeffizient von 15 % gilt⁴⁰⁷.
- Die Größe des Deponiekörpers der sonstigen Abfälle wurde mit 25.000 kg/EW (entsprechend 33.500 Mg) angenommen.
- Bei den Restflüssen in die Umwelt wurde kein Sickerwasser berücksichtigt.
- Die in der 3. Ebene (S-Bilanz im Vergleich zur Bauwirtschaft) gemachte Abschätzung bezüglich Transport bezieht sich auf den gesamten Verkehr.
- Bei der Behandlung der sonstigen Abfälle wurden folgende Annahmen getroffen:
 - Kompostierung der Bioabfälle (30 % Emission in die Umwelt, 10 % Deponierung)
 - Wiederverwendungsrate der Altstoffe 85 %
 - Rotteverlust bei der biologischen Restmüllbehandlung 10 %
 - Verbrennungsanteil des Restmülls 20 %, Deponierung 80 %
 - Einbindung des Schwefels in die Verbrennungsrückstände 99 %

S-Bilanz auf der 1. Ebene (Schwefelfluss im Bauwesen)

Der gesamte Inputfluss in das Bauwesen beträgt etwa 24 - 37 kg/EW.a, wobei der wesentliche Anteil in den gipshaltigen Gütern einschließlich Zement und Beton gespeichert ist. Der Beitrag des Bodenmaterials am Inputstrom ist mit unter 5 % gering. Der wesentliche Teil am Inputfluss wird durch Gips gedeckt (Schwefelfluss aus der Güterbilanz: 21 - 28 kg/EW.a), was eine gute Übereinstimmung der beiden Ansätze zeigt. Eine Herleitung der Zahlenwerte erfolgt in Anhang 2.

⁴⁰⁵ vgl. Baccini et al. (1993, S. 138)

⁴⁰⁶ vgl. ITAS/ifib (1998, S. 194)

⁴⁰⁷ vgl. Schachermayer et al. (1995b, S. 47)

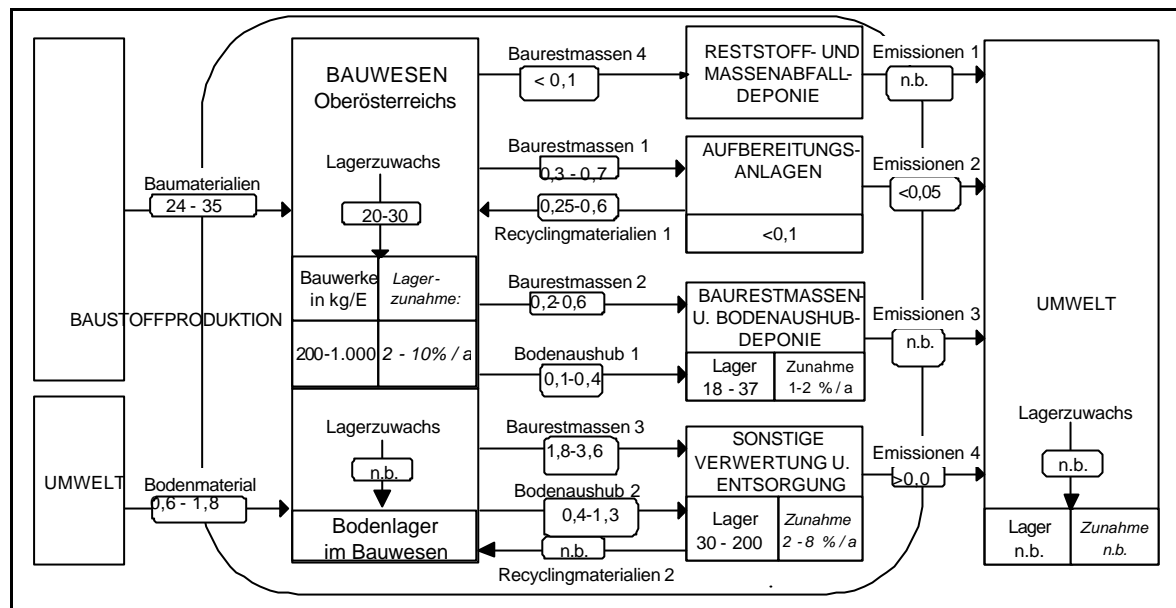


Abbildung 5.7: Schwefelbilanz im Bauwesen Oberösterreichs (Flüsse in kg/EW.a, Lager in kg/EW)⁴⁰⁸

Das Schwefellager im Bauwesen beträgt zwischen 200 - 1.000 kg/EW und wächst jährlich um 2-10 %, in etwa die Größenordnung des „normalen“ Lagerwachstums im Bauwesen. Die Verwendung der verschiedenen Methoden brachte dabei folgende Resultate:

mittlere Stoffkonzentration der Inputgüter: 652 - 984 kg/EW

Schwefelgehalt der Gipsprodukte lt. Güterbilanz Gips: 175 - 850 kg/EW

überschlägige Input-Output-Analyse von Gipsprodukten: 615 kg/EW

Baustoffklassifizierung Deutschland: 612 - 731 kg/EW

Die verschiedenen Ansätze zeigen verhältnismäßig enge Bandbreiten und, bis auf den unteren Wert der Gipsprodukte lt. Güterbilanz, eine gute Übereinstimmung in einer Größenordnung zwischen 600 und 1.000 kg/EW. Da der untere Wert von 175 kg/EW lediglich auf Gipsprodukten beruht, stellt er vermutlich eine untere Schranke dar.

Der gesamte Outputstrom an Schwefel aus dem Bauwesen liegt zwischen 3 und 7 kg/EW.a und erreicht somit 10 bis 30 % des Inputstroms von Schwefel. Betrachtet man nur den Bauschutt alleine, so reduziert sich der Anteil des Outputs am Input auf 10 - 15 % und liegt damit in der Größenordnung der allgemeinen Güterbilanz.

Die über die Gipsbilanz errechneten Werte liegen am oberen Ende oder über den Werten, die sich durch die Verwendung der Transferkoeffizienten aus BRIO ergeben. Erklärbar ist dies durch die Annahme eines höheren Anfalls aus Umbauschutt bei der Erstellung der Gipsbilanz. Aus diesem Grund liegt auch der Schwefelstrom, der direkt auf eine Deponie transferiert wird, in einer ähnlichen Größenordnung wie der Strom in eine Aufbereitungsanlage.

⁴⁰⁸ Baurestmassen 1: Input von Baurestmassen an Aufbereitungsanlagen
 Baurestmassen 2: Zu deponierende Baurestmassen
 Baurestmassen 3: Baurestmassen in die Sonstigen Verwertung und Entsorgung
 Baurestmassen 4: Baurestmassen zur Behandlung in der sonstigen Abfallwirtschaft
 Recyclingmaterialien 1: Wiederaufbereitete Baustoffe aus Aufbereitungsanlagen
 Recyclingmaterialien 2: Wiederaufbereitete Baustoffe aus der Sonstigen Verwertung und Entsorgung

ge und nicht um den Faktor 2 bis 3 niedriger. Hier sollten stärker regionalisierte Untersuchungen in der Lage sein, exaktere Daten über den Umfang von Baurestmassen aus Neubau und Umbau zu liefern.

An Aufbereitungsanlagen werden 0,3 - 0,8 kg/EW.a an Schwefel angeliefert. Bezogen auf eine gesamt angelieferte Bauschuttmasse von 220.000 Mg (ohne Straßenaufbruch) errechnet sich hieraus ein Schwefelanteil von 1,8 - 4,8 g/kg. Dies liegt etwas oberhalb der in Schachermayer et al. durchgeführten Messung von Bauschutt (0,14 - 0,29 g/100g)⁴⁰⁹, unterschreitet aber den von Brunner/Stämpfli gemessenen Wert von 5,8 g/kg⁴¹⁰, der sich hauptsächlich auf Baustellenabfälle bezieht. Auch dieses Resultat lässt sich mit dem höheren Gipsanteil im Umbauschutt erklären.

Der als Recyclingmaterial ins Bauwesen zurück transferierte Teil in einer Größenordnung von 0,3 - 0,7 kg/EW.a deckt nur noch rund 1-2 % der gesamten Inputmassen an Schwefel. Es fällt ferner auf, dass diese Schwefelmasse nicht mehr in Form von Gips im Bauwesen eingesetzt wird, sondern in einer Vermischung mit anderen Materialien vorliegt. Würde das Rezyklat komplett als Betonzuschlag eingesetzt werden, würde die allgemeine Schwefelfracht durch Beton durch diesen Recyclingschritt um 10 % erhöht werden. Ähnliches gilt, wenn das Rezyklat als Verfüllung im Tiefbau zum Einsatz gelangt. Bezogen auf die eingesetzte Menge an Bodenmaterial beträgt die Erhöhung der Schwefelfracht sogar 25 - 40 %. Es ist hier dringend erforderlich, zukünftige anfallende Schwefelmassen, die insbesondere in Gipsprodukten gespeichert sind, gezielter zu behandeln und als Gipsprodukte in den Kreislauf zurückzuführen. Ein Konzept zur Rückführung von Gipsprodukten fehlt bislang völlig, auch sind keine Bestrebungen aufgrund des Angebots an synthetischem Gips im Gange.

Die Menge an Schwefel in den Deponien konnte nur sehr grob mit 30 - 200 kg/EW abgeschätzt werden. Eine Gegenrechnung über überschlägige Input-Output-Ströme von Gips lieferte mit rund 160 kg/EW einen Wert, der eher am oberen Ende der Bandbreite liegt. Das Deponielager wächst in einer ähnlichen Größenordnung wie das Lager im Bauwesen mit rund 2- 8 % pro Jahr.

Nicht bestimmt wurde die Schwefelflüsse aus dem Lagerkörper der Deponien sowie dem Lager der Sonstigen Verwertung und Entsorgung in die Umwelt, da sie stark von lokalen Gegebenheiten abhängig sind (lokales Schwefelangebot, Eindringen von Wasser). Die bei Elutionsproben festgestellten Werte für den Schwefelaustrag liegen jedoch häufig über den Trinkwassergrenzwerten⁴¹¹, so dass nähere Untersuchungen erforderlich sind, auch vor dem Hintergrund eines ggf. festzulegenden Schwefel- oder Sulfatgrenzwerts für (Bauschutt-) Deponien.

⁴⁰⁹ Schachermayer et al. (1995b, S. 44)

⁴¹⁰ Brunner/Stämpfli (1993, S. 32)

⁴¹¹ vgl. z.B. Rentz et al. (1997, S. 230)

S-Bilanz auf der 2. Ebene (Baurestmassen vs. sonstige Abfallwirtschaft)

Vergleicht man die Schwefelflüsse in den Baurestmassen mit den Schwefelfläßen in der sonstigen Abfallwirtschaft (nur feste Abfälle), fällt der um den Faktor 4-6 höhere Input bei einem annähernd gleichen Output auf. Diese Tatsache resultiert in einer absolut betrachtet größeren Lagerbildung bei den Baurestmassen. Bei einem relativen Vergleich wachsen jedoch beide Deponiekörper mit etwa der gleichen Dynamik (ca. 3-5 % bei den Baurestmassen, ca. 3 % in der sonstigen Abfallwirtschaft der festen Abfälle). Zur endgültigen Beurteilung der Bedeutung der Baurestmassen im Vergleich zur sonstigen Abfallwirtschaft sollte jedoch die Größenordnung des Deponiekörpers der sonstigen Abfälle näher bestimmt sowie die Restflüsse aus den jeweiligen Deponiekörpern quantifiziert werden. Das Verhältnis der Massenströme deutet allerdings darauf hin, dass Maßnahmen zur Steuerung der Schwefelfläße im Bereich fester Abfälle sinnvollerweise im Bauwesen angesetzt werden sollten. Eine Erläuterung zur Berechnung der Daten erfolgt in Anhang 2, dabei sind die Namen der Flüße identisch zum Schwefelfluß der 1. Ebene.

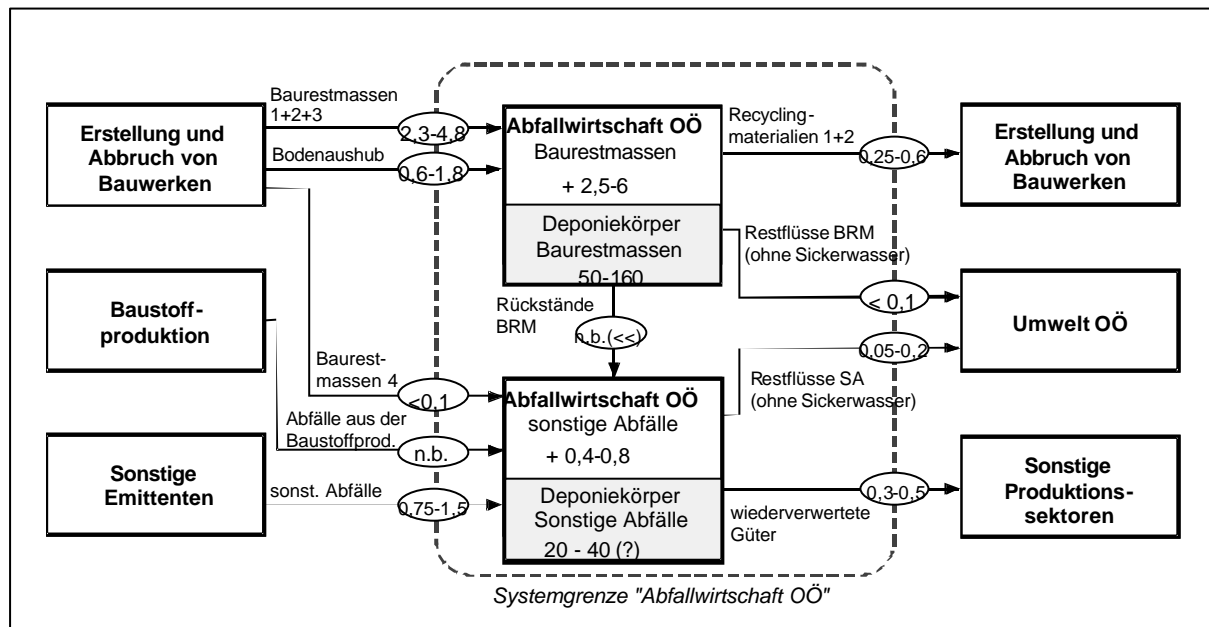


Abbildung 5.8: Schwefelfluss in den Baurestmassen im Vergleich zum Schwefelfluss in der sonstigen Abfallwirtschaft (nur feste Abfälle); Angaben in kg/EW.a bzw. kg/EW

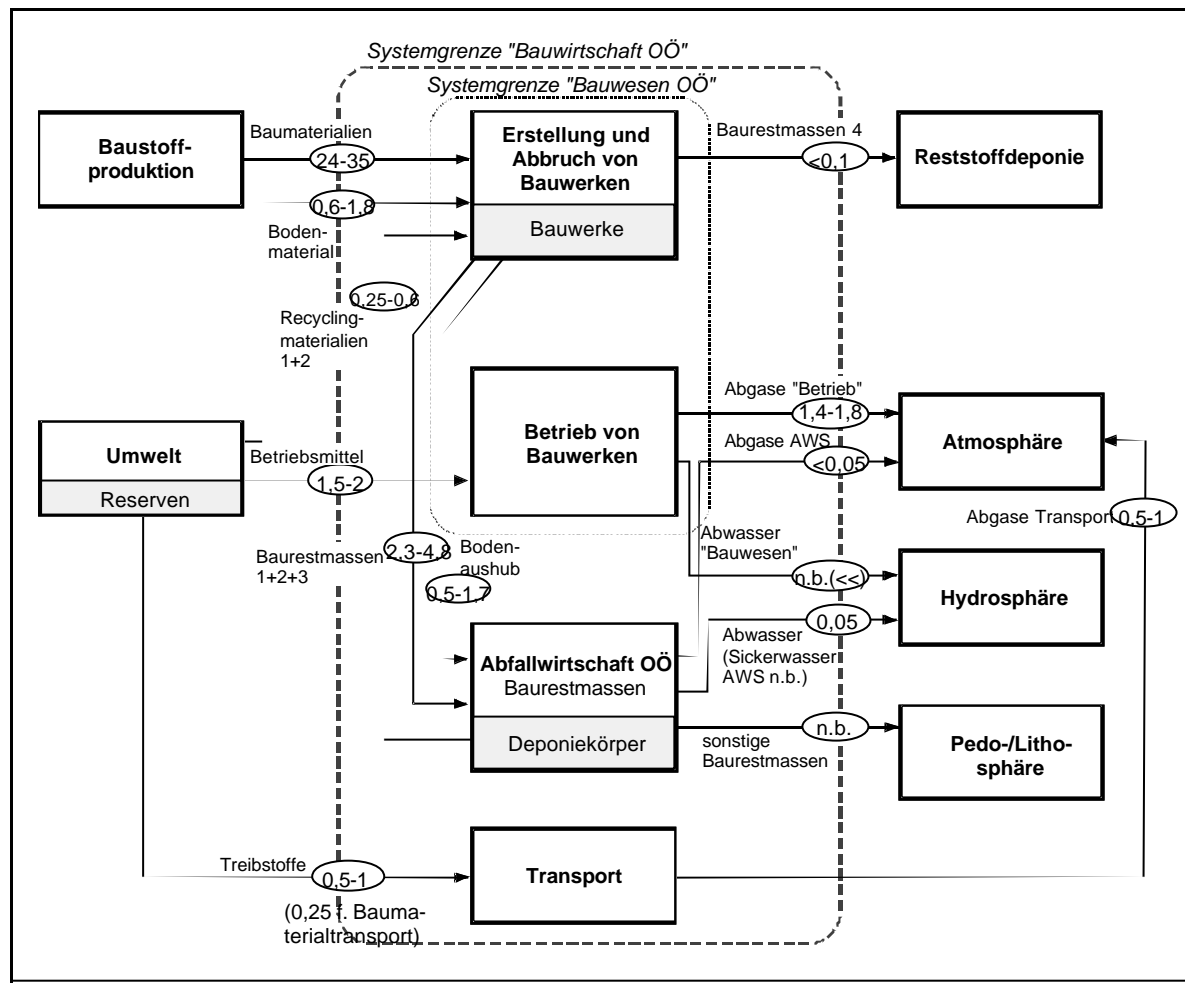
S-Bilanz auf der 3. Ebene (Baurestmassen vs. restliche Bauwirtschaft)

Abbildung 5.9: Schwefelfluss in den Baurestmassen im Vergleich zum Schwefelfluss in der Bauwirtschaft; Angaben in kg/EW.a

Anmerkungen und Annahmen:

- Die Werte für Betriebsmittel beziehen sich auf Raumwärme und elektrische Energie⁴¹².
- In den Betriebsmitteln nicht enthalten sind Schwefelemmissionen, die etwa bei der Stromerzeugung aus Kraftwerken emittiert werden.
- In den Abgasen aus der Heizung von Bauwerken finden sich 90 % des Schwefels wieder, der Rest verbleibt in der Asche und wird deponiert⁴¹³.
- Abgase aus der Abfallwirtschaft Baurestmassen entstammen der Verbrennung von Holz und Kunststoffen im Bereich der sonstigen Entsorgung.
- Der Wert für Treibstoffe wurde nach METAPOLIS-Werten bestimmt (Luftausstoß von Schwefel in der Schweiz 1990: 4.600 Mg -> 0,7 kg/EW.a). Eine Überprüfung mit gerechneten Emissionen für den Güterverkehr in Oberösterreich (ca. 0,5 kg/EW.a) zuzüglich

⁴¹² vgl. Baccini et al. (1993, S. 176). Für METAPOLIS werden 1,1 kg/EW.a zum Heizen von Privathaushalten angenommen, zusätzlich weitere 50-100 % hiervon zum Heizen von Nichtwohngebäuden

⁴¹³ vgl. Baccini et al. (1993, S. 177)

des Individualverkehrs (Annahme: gleiche Größenordnung von 0,5 kg/EW.a) ergibt eine ungefähre Übereinstimmung ⁴¹⁴.

Einen überragenden Anteil der Emissionen bilden die Abgase zum Betrieb der Gebäude (Heizung). Diese sind aufgrund von Minderungsmaßnahmen der letzten Jahre stark rückläufig, wofür sowohl effiziente Schwefelrückhaltetechniken (Rauchgasentschwefelung) in den Kraftwerken als auch eine veränderte Zusammensetzung der Energieträger verantwortlich sind.

Relativ zur Abnahme der Schwefelemissionen aus dem Gebäudebetrieb steigt die Bedeutung der transportbedingten Schwefelemissionen, die bereits jetzt für 30-50 % der gesamten atmosphärischen Schwafeleinträge verantwortlich sind. In Zukunft dürfte dieser Anteil noch zunehmen, da von einem Rückgang des Transportaufkommens nicht auszugehen ist und Emissionsminderungstechniken, abgesehen von der Einführung von schwefelarmem Treibstoff, nicht in Sicht sind.

Schwefel im direkten Abwasserstrom aus dem Betrieb von Bauwerken können als gering angesehen werden, da schwefelhaltige Baustoffe (hauptsächlich Gips) aufgrund ihrer Verwendung in Innenräumen nicht ausgewaschen werden und andererseits der Schwefel in den Betriebsmitteln zur Heizung in die Atmosphäre und auf die Deponie entweichen. In dieser Rechnung ist der Schwefelstrom, der durch Niederschlag zu Auswaschungen an Gebäuden führt („saurer Regen“), nicht enthalten.

S-Bilanz auf der 4. Ebene (Bauwirtschaft und gesamte Anthroposphäre)

Die Vergleichsdaten mit Sonstigen Emittenten beziehen sich auf den Schwefelfluss durch Privathaushalte inklusive privatem Verkehr und wurde gewählt, da hier durch die Untersuchung METAPOLIS relativ genaue Daten zur Verfügung stehen ⁴¹⁵.

Der Vergleich der Bauwirtschaft mit dem privaten Haushalt zeigt, dass die Lagerbildung im System Bauwirtschaft diejenige im privaten Haushalt um mehr als zwei Größenordnungen übersteigt. Während der private Haushalt bezüglich Schwefel einen Durchflussreaktor darstellt, fungiert das Bauwesen als Speicher auf lange Zeit, wobei der Input ins Bauwesen den jährlichen Fluss in den Privathaushalt um etwa den Faktor 5 bis 8 übersteigt.

Das Verhältnis der Restflüsse ist noch nicht zu beurteilen, da zuvor eine Abschätzung der in die Hydrosphäre gelangenden Schwefelflüsse aus den Deponiekörpern erfolgen muss. In jedem Fall sind die in die Atmosphäre gelangenden Schwefelflüsse aus dem Bauwesen klein gegen die Frachten von anderen Emittenten, insbesondere bei der Verbrennung fossiler Energieträger.

⁴¹⁴ vgl. Baccini et al. (1993, S. 58) sowie Glenck et al. (1996, S. 48)

⁴¹⁵ vgl. Baccini et al. (1993). Die Flüsse durch Privathaushalte müssen noch um die Flüsse durch Industrie und Gewerbe (I+G) ergänzt werden, jedoch liegen hierfür nur Schätzungen vor, aus denen zusätzlich die durch Baustoffproduktion ausgelösten Schwefelströme (z.B. Brennen von Zement) herausgerechnet werden müssen:

S-Input I+G-Verkehr:	0,5 kg/EW.a	S-Output I+G-Verkehr	0,5 kg/EW.a
S-Input I+G-Energie:	3-4 kgEW.a	S-Output I+G-Energie	3-4 kg/EW.a
S-Input I+G-Güter:	0,5 kg/EW.a	S-Output I+G-Güter:	0,2 - 0,5 kg/EW.a
S-Input I+G-Wasser:	1 kg/EW.a	S-Output I+G-Wasser:	1 - 1,3 kg/EW.a

Es zeigt sich, dass durch I+G Schwefelflüsse in einer ähnlichen Größenordnung wie durch Privathaushalte verursacht werden

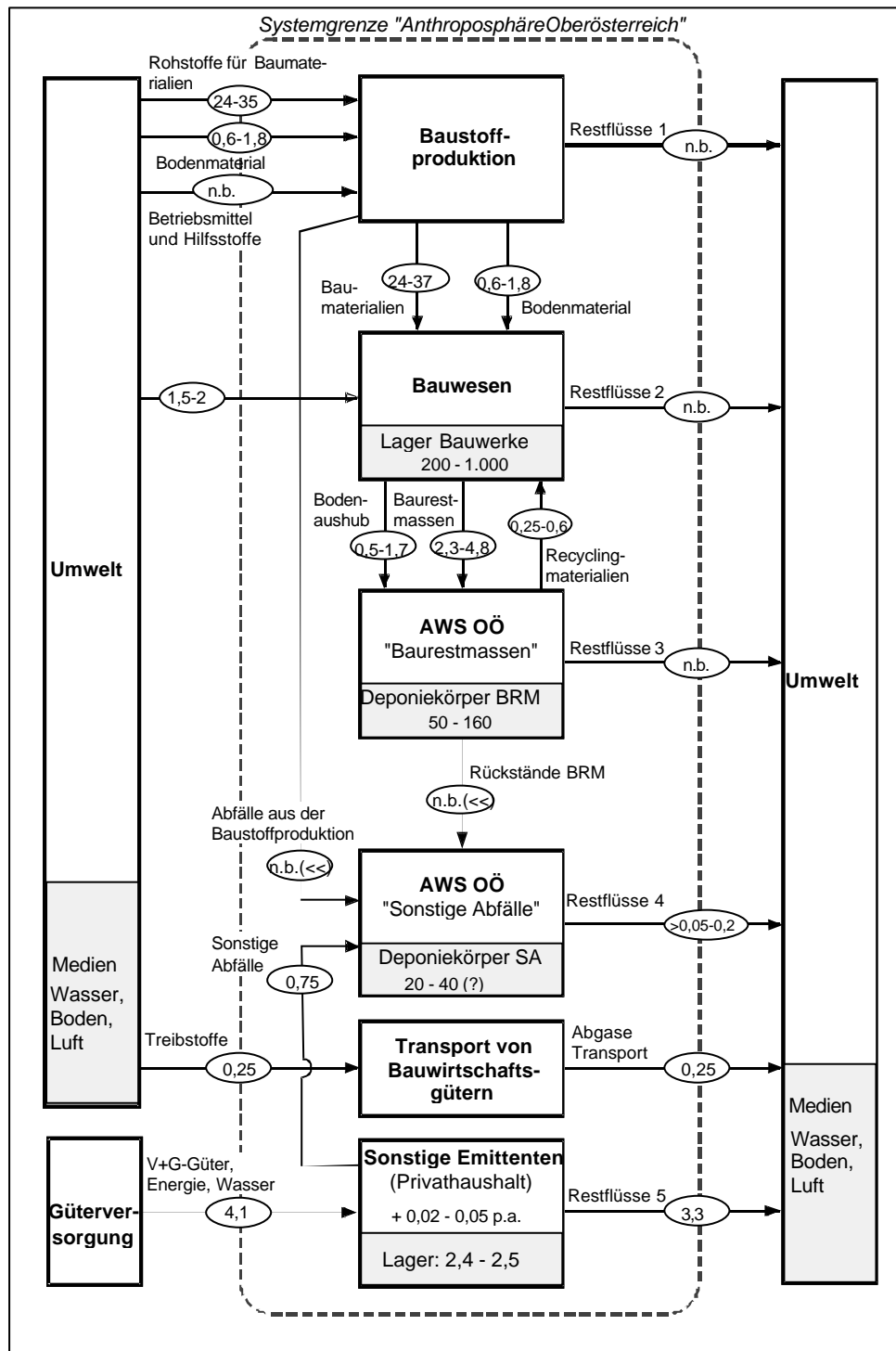


Abbildung 5.10: Schwefelfluss in den Baurestmassen im Vergleich zum Schwefelfluss in Oberösterreich (Ebene 4); Angaben in kg/E bzw. kg/E.a

Schlussfolgerungen

Aus der Schwefelbilanz lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Gips ist der überragende Schwefelträger im Bauwesen, der für mindestens 80 % der Schwefelflüsse verantwortlich zeichnet. Will man Schwefelflüsse im Bauwesen steuern, so sind Maßnahmen beim Gips anzustreben. Wie bereits in der Gips-Güterbilanz gezeigt, steigt der Inputstrom zur Zeit stark an.
- Die Schwefelflüsse im Bauwesen sind nicht im Gleichgewicht. Durch Baumaterialien erfolgt eine signifikante Speicherung von Gips im Lager des Bauwesens, die etwa zu einem 5:1-Verhältnis zwischen Input und Output führt.
- Die größte Gefahr geht von Schwefel durch die diffuse Eintragung von Sulfat in die Hydrosphäre aus. Die Größenordnung dieses Flusses ist zur Zeit nicht bestimmt, jedoch deuten Voruntersuchungen an, dass Sulfatkonzentrationen in Auslaugungen regelmäßig über den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung liegen. Gegebenenfalls ist die Festlegung eines Grenzwertes für Sulfat bei der Deponierung zu erwägen.
- Die Rezyklierung des Schwefels in Baurestmassen ersetzt etwa 1-2 % des Schwefelinputs. Es fällt auf, dass die Rezyklate grundsätzlich Materialgemische darstellen, die als Betonzuschlag, im Straßenbau oder bei der Verfüllung Verwendung finden (Downcycling). Dies führt, bedingt durch die Rezyklierung, zu einer Erhöhung der Schwefelkonzentration in diesen Gütern um 10-30 %. In Anbetracht zukünftiger Mengen von Gipsprodukten müssen Maßnahmen entwickelt werden, wie eine Vermischung dieser Schwefelmengen in eigentlich schwefelarmen Gütern durch Kreislaufführung auf der Ebene der Gipsprodukte verhindert werden kann.
- Untersuchungen zeigen, dass sich Schwefel bei der Bauschuttaufbereitung in der Feinfraktion anreichert, die vielfach für Hinterfüllungen eingesetzt wird. In Untersuchungen ist zu klären, welche Bedeutung diese Schwefelanreicherung in den jeweiligen Einsatzorten besitzt, insbesondere im Hinblick auf diffuse Restflüsse in die Hydrosphäre.
- Die Rauchgasentschwefelung ist ein geeignetes Verfahren, um Schwefelemissionen in die Atmosphäre deutlich zu verringern. Der Transfer dieser Schwefelmassen in Bauprodukte verlagert jedoch die Problematik von einer Belastung der Atmosphäre in eine, nach Ende der Nutzungszeit der Bauprodukte, auftretende Belastung der Pedosphäre und Lithosphäre sowie durch Auslaugung aus schwefelhaltigen Deponiekörpern der Hydrosphäre. Es ist erforderlich, aus abfallwirtschaftlicher Sicht Konzepte für die Behandlung dieser im Baulager temporär zwischengespeicherten Schwefelmassen zu entwickeln.
- Es existiert weder in Oberösterreich noch in Deutschland ein Bewirtschaftungskonzept für gipshaltige Baurestmassen.

5.3 Die Darstellung des Gipslagers im Bauwesen nach den Kriterien Dispersion und Verweilzeit

Unter Hinzuziehung der bisherigen Ausführungen soll im folgenden der Stoffstrom Gips seit 1950 mit besonderer Beachtung die Faktoren Dispersionsgrad und Verweilzeit dargestellt werden. Die Abbildung erfolgt in Form eines Kurvenverlaufs mit den Dimensionen Zeit und Menge auf den Achsen. Der Dispersionsgrad kann entweder übereinander gelegt dargestellt

oder in Form einer dritten Dimension abgebildet werden. Die Daten einzelner Gipsprodukte werden zu Kompartimenten agglomeriert, wobei in einem Kompartiment Produkte mit gleichen Dispersionsgraden zusammengefasst sind. Es wird also zunächst von der Produktebene abstrahiert und erst nach erfolgter Analyse und Interpretation der Resultate wieder zu den Produkten und den mit ihnen verbundenen Ursachen zurückgegangen. Folgende Annahmen werden gemacht:

- Der Dispersionsgrad und die Verweilzeitverteilung eines Gipsprodukts bleiben im gesamten Betrachtungszeitraum konstant
- Vor 1950 in den Baubereich eingebrachte und jetzt noch im Stofflager befindliche Gipsprodukte werden vernachlässigt (vgl. Kapitel 5.3.3)
- Die Inputströme basieren, sofern verfügbar, auf Daten der amtlichen Produktionsstatistik. Schätzungen werden im Hinblick auf Estrichverteilungen sowie zur Aufteilung von Vollgipsplatten und Gipskartonplatten auf normale Produkte und Produkte zur Wärmedämmung vorgenommen.
- Die Abgangsmengen werden aufgrund der jeweiligen Weibull-Verteilung rechnerisch auch für bereits vergangene Abgangszeiträume ermittelt

Gipsprodukt		Lebensdauer T	Ausfallverhalten a	Dispersionsgrad
Baugipse	Anhydritestrich	30	6	8
	Gipsestrich	30	6	8
	Putzmörtel	35	4	9
	Gipskleber	40	2	9
	Ansetzbinder	40	2	9
Gipsplatten	Vollgipsplatte	40	2	3
	Vollgipsplatte zur Wärmedämmung	40	2	6
	Gipsfaserplatte	40	2	7
	Gipskartonplatte	40	2	5
	Gipskartonplatte z. Wärmedämmung	40	2	7
Sonstige Anwendungen	Modellformengips Keramikindustrie	5	10	2
	Modellformengips nicht Keramikind.	1	10	4
	Medizinalgips	1	10	4
	Zement	90	3	5

Tabelle 5.9: Parameter für die Darstellung der Stoffströme und Stofflager von Gips

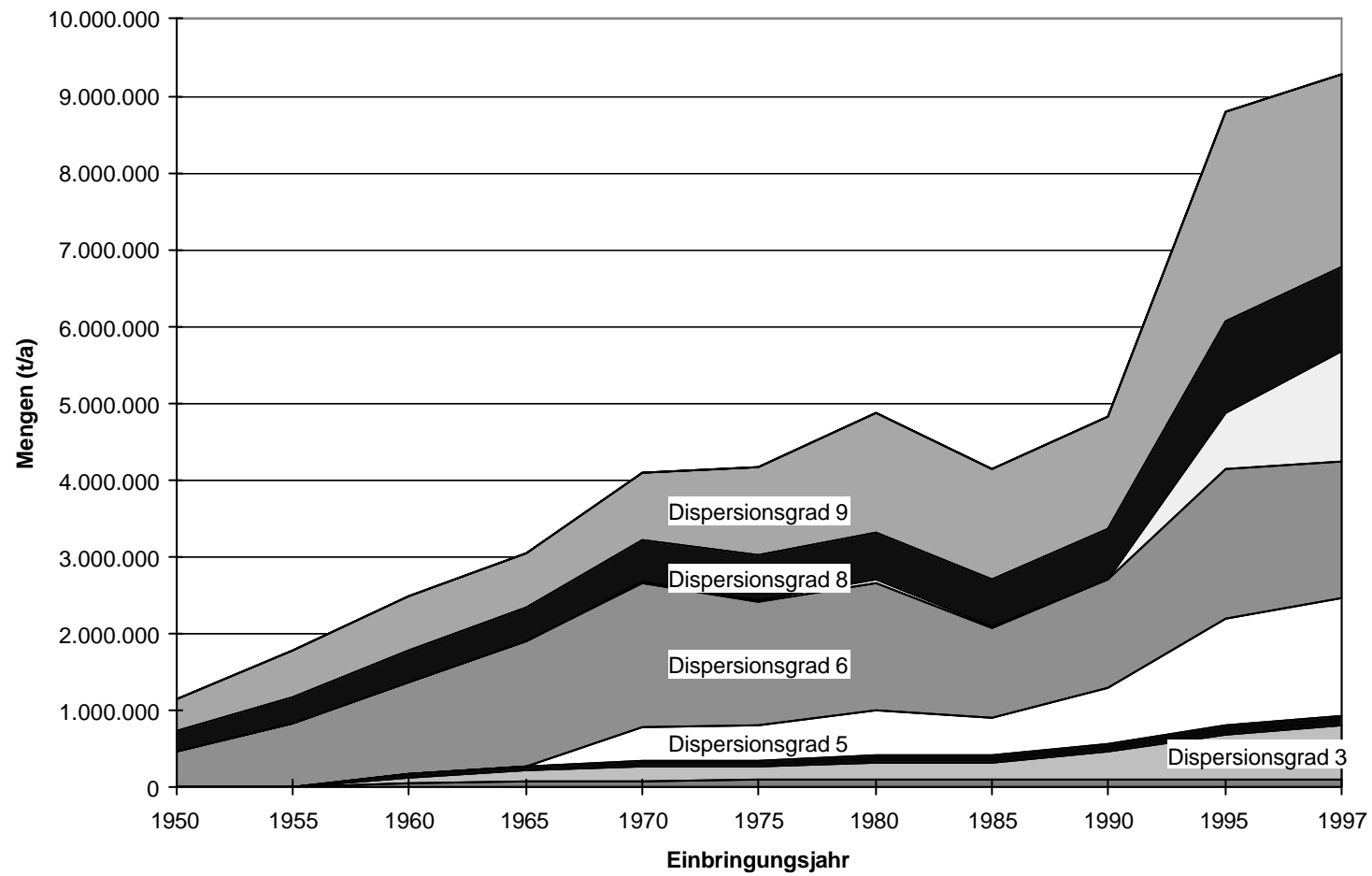


Abbildung 5.11: In Verkehr gebrachte Gipsmengen in Deutschland zwischen 1950 und 1997, aufgeteilt nach Dispersionsgrad

Kompartiment-/zeitabhängige Darstellung der ausgetragenen kumulierten Gipsmengen

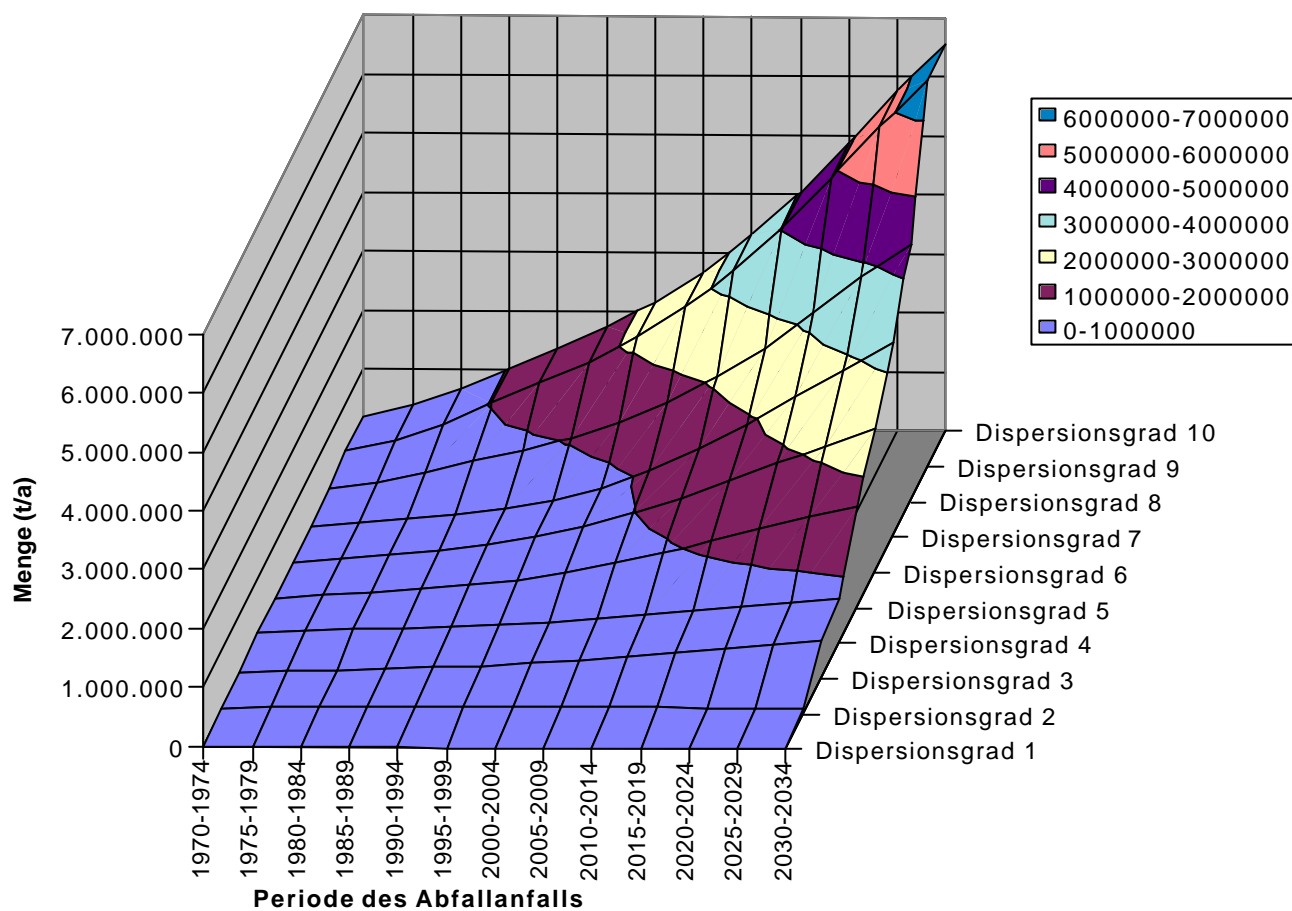


Abbildung 5.12: Prognostizierte jährliche Abfallströme an Gipsprodukten 1970 - 2034

Bei der Interpretation der Ergebnisse zeigt sich eine deutliche Konzentration der eingebrachten Gipsmengen im Bereich ungünstig bewerteter Dispersionskompartimente. Diese Relation hat sich auch in den vergangenen 10-15 Jahren, als die eingetragenen Gipsmengen aufgrund des Aufkommens von REA-Gips deutlich angestiegen sind, nicht verändert⁴¹⁶. Gleichzeitig schwellen die eingebrachten Gipsmengen in den letzten Jahren stark an, was sich in kontinuierlich wachsenden prognostizierten Abfallmengen bereits ab dem Jahr 2000 niederschlägt. Auch über das Jahr 2030 hinaus wird der Abfallstrom mindestens auf dem Niveau von 2030 verbleiben.

Gemäß der Modellrechnung werden für 1999 etwa 1,7 Mio. t Gips im Abfallstrom prognostiziert. Zieht man hiervon etwa 150.000 t ab, die Bestandteil des Zements sind, verbleibt etwa eine Menge von 1,5 Mio. t. Nach Angaben des Gipsverbandes wird jedoch lediglich ein Abfallanfall von 900.000 – 1.000.000 t erwartet⁴¹⁷. Gemäß der oben skizzierten grundsätzlich höheren Schätzung von Abfallmengen in Bottom-Up-Darstellungen scheint die im Modell angenommene Menge eine Obergrenze darzustellen, die der tatsächlichen Abfallmenge vermutlich aber nahe kommt, da ein signifikanter Teil nicht erfasst ist.

5.4 Zusammenfassung

Aus den Darstellungen können sich folgende Aussagen ableiten lassen:

- In der Graphik der Zugänge ist der Boom der Gipsprodukte etwa seit 1990 deutlich abzulesen. Er scheint sich jetzt auf einem hohen Niveau von etwa 9 Mio. t/a zu stabilisieren, mehr als doppelt soviel wie noch vor 10 Jahren. Auffällig ist die relative Zunahme der Dispersionsgrade 3, 5 und 7, denen die Gipsplatten und hier insbesondere die Gipsfasersplatte zugeordnet sind. Demgegenüber ist die relative Bedeutung des Dispersionsgrads 6 (Zement) rückläufig. Putze und Estriche haben etwa ihren prozentualen Anteil in etwa gehalten.
- Die in 30 bis 50 Jahren anfallenden Abfallgipsströme sind um den Faktor 6 bis 8 höher als die heutigen. Es müssen also Strategien und Maßnahmen entwickelt werden, was mit diesen Mengen geschehen soll.
- Von den zukünftig zu erwartenden Abfallströmen von Gips sind lediglich etwa 25 % einem günstigen Dispersionsgrad (≤ 5) zugeordnet. Daraus folgt, dass der Beitrag potentiell rezyklierbarer Gipsmengen zur Ressourcenschonung unter gegenwärtigen Bedingungen eher gering ist. Auch in der Prognoserechnung bis 2034 verändert sich diese Relation nicht.
- Die Verwendung von Gips übersteigt gegenwärtig den Output an Gips bei weitem (etwa um den Faktor 5-6 bezogen auf die Modellrechnung). Unter Berücksichtigung der Verweilzeiten des Gipses im Baupuffer wird hier ein sehr großes Lager aufgebaut. Gleichzeitig wachsen die Abfallströme jährlich um 5 % gegenüber dem Vorjahr, gleichbedeutend mit einer Verdoppelung der Abfallmengen in 15 Jahren. Wenn es nicht gelingt, die Dispersionsgrade des heute bereits im Lager befindlichen Materials durch Entwicklung neuer Technologien zu verbessern, werden im Jahr 2035 4 Mio. t Abfallgips aus dem Baube-

⁴¹⁶ Aussagekräftig ist die relative Betrachtung dann, wenn Zement nicht mit in die Betrachtung einbezogen wird, da die Gipsmengen für Zement in den Jahren 1950-1985 die Verwendung von Gips wesentlich dominiert hat, aber vom Ereignis des Auftretens von REA-Gips unabhängig ist.

⁴¹⁷ Mündliche Aussage von Dr. Kersten, Bundesverband Gipsindustrie sowie Dr. Kollinger, Österreichischer Gipsverband

stand in den Dispersionsgraden 7-10 anfallen, die für eine Kreislaufführung nicht geeignet sind.

- Bereits im Jahr 2020 fallen jährlich 1,5 Mio. t Gips mit günstigen Dispersionsgraden (≤ 5) an. Das entspricht bereits 50 % der vor Beginn der Rauchgasentschwefelung in die Produktion von Gipsprodukten aufgebrachten Mengen (z.B. in den Jahren 1980-1985, Betrachtung jeweils ohne Zement). Würde die Nachfrage nach Gipsprodukten in 20 Jahren auf das Niveau der 80er Jahre zurückgehen, könnte ein wesentlicher Teil des Bedarfs aus im Kreislauf geführten Gips gedeckt werden.
- Der Abfallstrom der Estriche und Putze macht heutzutage mit über 1 Mio. t etwa 65 % des gesamten Abfallgipsaufkommens aus. Obwohl der Anteil am gesamten Gipsstrom bis 2035 auf rund 50 % zurückgeht, wird der absolute Abfallstrom dann auf über 3 Mio. t angeschwollen sein. Diese Größenordnung ist im Hinblick auf die Verunreinigung anderer mineralischer Baureststoffe und der Sicherheit von Bauschuttdeponien, sofern es diese 2035 noch gibt, nicht tolerierbar. Es müssen also sowohl technologische Verfahren zur wirtschaftlichen Reife entwickelt werden, diesen Abfallstrom zumindest von anderen Abfallströmen zu trennen und separat zu deponieren und parallel dazu bereits jetzt konstruktive Maßnahmen eingeleitet werden, damit der Dispersionsgrad der neu eingebrachten Gipsprodukte gesenkt wird. Gerade bei Estrichen und Putzen wäre aufgrund der relativen kurzen Lebensdauern von 30-35 Jahren bald mit einem Effekt zu rechnen.
- Zur Beurteilung von produktspezifischen Einzelmaßnahmen muss vom abstrakten Dispersionsgrad auf die Produkte zurückgegangen und diskutiert werden, ob es Möglichkeiten gibt, mit alternativen Produkten / Produktzusammensetzungen den gleichen Nutzen mit einem günstigeren Dispersionsgrad zu erreichen. Bei dieser Betrachtung sind natürlich externe Effekte mit zu berücksichtigen (z.B. erhöhter Energieaufwand, Verlagerung von Problemen in andere Umweltmedien).
- Allein seit 1950 sind über 180 Mio. t Gips im Baubereich in Deutschland eingesetzt worden. Unter Berücksichtigung der Output-Mengen und vor 1950 eingebrachter Mengen dürfte sich das gegenwärtige „Gipslager“ im Baubereich auf eine ähnliche Größenordnung (geschätzt sind etwa 160 Mio. t) belaufen. Da zur Zeit nur rund 25-30 % günstigen Dispersionsgraden zuzuordnen sind, verbleiben mindestens 100 Mio. t, die sich gegenwärtig im Zwischenlager Bau befinden und deren zukünftiger Verbleib geklärt werden muss.

Im nachfolgenden Kapitel werden Überlegungen angestellt, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um Erkenntnisse und Anforderungen, die sich aus den Darstellungen ableiten lassen, zu realisieren. Dabei sollen die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die modellhafte Darstellung der Gipsströme abgebildet und so die Wirkung für zukünftige Generationen abgeschätzt werden.

6. ERKENNTNISSE AUS DEM BESCHREIBUNGSMODELL FÜR DIE GESTALTUNG DES STOFFSTROMS GIPS

Das letzte Kapitel hat die eingesetzten Stoffströme von Gips im Bauwesen seit 1950 bis 1997 angesprochen und gezeigt, wie diese Ströme zum Aufbau eines gigantischen Lagers an Gips in der gebauten Umgebung in einer Größenordnung von mindestens 150 Mio. t geführt haben. Ferner wurde deutlich, dass der Aufbau dieses Lagers nicht ein lange zurückliegendes Phänomen darstellt, sondern gerade in den letzten Jahren im Begriff ist, sehr dynamisch zu wachsen. Zudem ist aufgrund der allgemeinen Einschätzung des Stoffes Gips nicht abzusehen, dass die Dynamik in Kürze nachlässt. Weiter konnte aus der einfachen Betrachtung der bislang ins Lager eingeflossenen Mengen abgelesen werden, dass das Lager an Gips im Bauwesen eines Tages in Form von Abfall wieder abgetragen oder zumindest Stoffe hieraus in die Systeme der Abfallwirtschaft eingebracht werden. Wann und mit welcher zeitlichen Entwicklung dieser Eintrag in die Abfallwirtschaft erfolgen wird, kann heute lediglich geschätzt werden. Anhand des Modells und der ihm zugrunde liegenden Prämissen sollte eine größtmögliche Plausibilität der Vorhersage erreicht werden.

Sieht man einmal von der Prognose der Abfallmengen und -zeiträume ab, stellt die modellhafte Abbildung der Stoffströme und Stofflager jedoch lediglich eine „Massenbilanz“ aufgrund bereits eingetretener Ereignisse in Form einer Bestandsaufnahme dar. Es ist Gegenstand der folgenden Ausführungen, abzuschätzen, wie und in welchem Ausmaß zukünftige Maßnahmen und Ereignisse den Verlauf der Stoffströme und Stofflager beeinflussen.

In Abbildung 6.1 sind entlang des Stoffstroms im Bauwesen Einfluss- und Gestaltungsfaktoren aufgelistet, von denen einige in den nachfolgenden Überlegungen im Sinne einer Hypothese formuliert und ihr Einfluss auf die Entwicklung des Stoffstroms argumentiert werden.

1. Quantitative Einflussfaktoren auf der Inputseite:

- Veränderung des Primärrohstoffangebots. Die Versorgung mit Gips zur Produktion der Gipsprodukte erfolgt bislang im wesentlichen über die beiden Quellen Naturgips und REA-Gips, Veränderungen durch außenwirtschaftliche Aktivitäten sind bislang vernachlässigbar. Es soll hier die Auswirkung auf die Baustoffherstellung untersucht werden, wenn das Rohstoffangebot variiert.
- Veränderung des Nachfrageverhaltens der Nutzer nach Gipsprodukten, sei es durch Variation der Neubautätigkeit oder in der Veränderung der Attraktivität von Gipsprodukten, die auch durch ordnungsrechtliche oder ökonomische Steuerungsinstrumente herbeigeführt werden kann.
- Verbringung auf Monodeponien, dadurch Reduktion des Angebots.

2. Qualitative Veränderung des Inputs durch recyclinggerechte Konstruktion.

3. Einflussfaktoren auf der Outputseite:

- Recycling von Gips unter sich ändernden abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen.
- Neue Technologien für die Behandlung von Abfallgips aus dem Bausektor.

4. Einflussfaktoren im Bestand durch Verlängerung der Lebensdauer und bessere Erfassung von Stoffströmen. Diese Fragestellung ist identisch mit einer Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse der Abfallprognose im Modell.

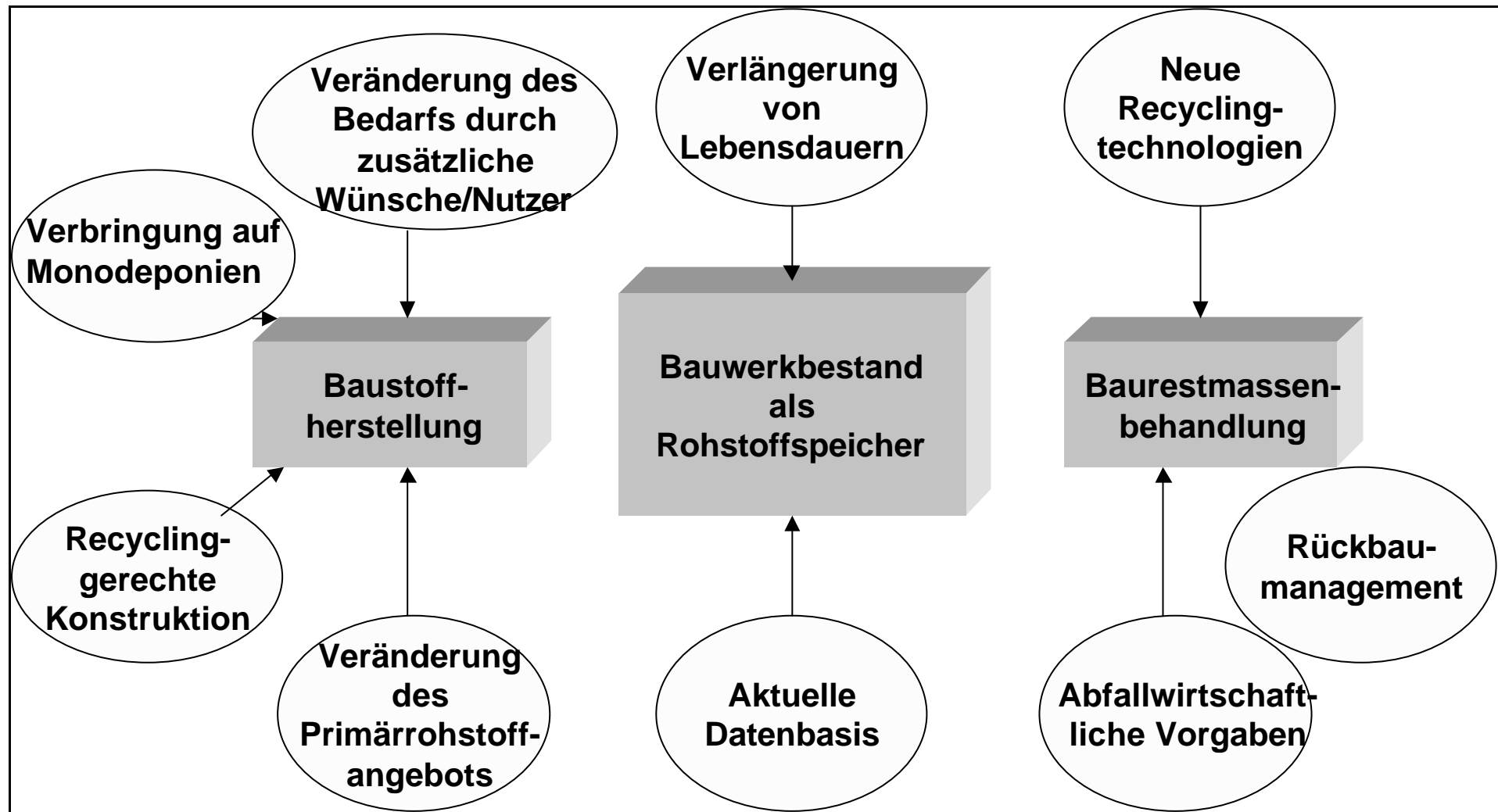


Abbildung 6.1: Einfluss- und Gestaltungsmöglichkeiten im Stoffstrom Bauwesen

6.1 Quantitative Einflussfaktoren auf der Inputseite

6.1.1 Veränderung des Primärrohstoffangebots

Das Angebot an Gips zur Herstellung neuer Gipsprodukte speist sich im wesentlichen aus zwei Quellen: Naturgips, der entweder als Gipsstein oder als Anhydritstein gewonnen wird, sowie Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kohlekraftwerken. Darüber hinaus besteht ein Außenhandel mit Gips und Gipsprodukten, der etwa eine Größenordnung von 500.000 t/a erreicht, sich aber dabei in etwa zu einer ausgeglichenen Bilanz saldiert. Weiterhin fällt aus chemischen Prozessen Gips an, von dem jedoch nur eine Menge von etwa 200.000 t/a aus der Flusssäureproduktion als Ansetzbinder oder Anhydritestrich eingesetzt wird. Restliche Mengen dieser Gipse werden als Bergbauanhydrit verwendet.

Die nachfolgende Tabelle 6.1 zeigt eine Gegenüberstellung von Angebot und Verbrauch von Gipsprodukten in Deutschland⁴¹⁸:

			1991	1995	2000 ⁴¹⁹
Angebot	Naturgips		3.500	5.000	?
		Gipsstein	3.000		
		Anhydrit	500		
	Techn. Gips⁴²⁰		3.630	4.000	6.250
		REA-Gips Steinkohle	1.950	1.900	1.800
		REA-Gips Braunkohle	1.200	1.500	3.850
		Flusssäureanhydrit	330		
		Citronensäuregips	150	600	600
	Außenhandel		- 125	-40	< -500
		Import	426	500	?
		Export	540	540	540
S Angebot			7.000	9.000	> 5.700
Verbrauch	Gipsindustrie		3.740	7.073	7.100
		Baugips (Putz, Estrich)	2.156	3.906	
		Gipsplatten	1.264	2.867	
		Sonstiger Gips	320	300	
	Zement	Zementherstellung	1.547	1.700	1.700
	Bergbau	Bergbauanhydrit	350	250	30
S Verbrauch			5.637	9.000	8.800
Saldo Angebot-Verbrauch			+1.350⁴²¹	+/- 0	?

Tabelle 6.1: Angebot und Verbrauch von Gips in Deutschland, Angaben in 1000 t

⁴¹⁸ In Anlehnung an NLfÖ (1997, S. 29), Haug (1994, S. 311) sowie persönliche Informationen des Bundesverbands Gips

⁴¹⁹ Werte geschätzt

⁴²⁰ In den REA-Gipsmengen sind bereits 10 % freie Feuchte abgezogen

⁴²¹ Der überschüssige Saldo in 1991 ist vermutlich dadurch zu erklären, dass nicht der gesamte REA-Gips die Qualitätsanforderungen zur Verwertung in der Gipsindustrie erfüllen konnte und daher zu Rekultivierungsmaßnahmen oder zum Verfüllen von Tagebaurestlöchern verwendet wurde.

6.1.1.1 VERÄNDERUNG IM ANGEBOT VON REA-GIPS

In Tabelle 6.1 zeigt sich, dass die technischen Gipse aus der Rauchgasentschwefelung der Kohleverbrennung zur Stromerzeugung im Jahr 2000 bereits rund 2/3 des Angebots an Gips decken, das zur Herstellung von Gipsprodukten benötigt wird. Für die Prognose über den zukünftigen Stoffstrom der technischen Gipse aus der Rauchgasentschwefelung kann wiederum die Entwicklung der Kohleverbrennung herangezogen werden. Soll eine Veränderung des Angebots an Primärrohstoffen modelliert werden, müssen daher folgende Einflussfaktoren untersucht werden:

- Entwicklung der Bruttostromerzeugung in Deutschland in den nächsten Jahren
- Künftiger Energieträgermix zur Bruttostromerzeugung
- Grad der Entschwefelung von Kohlekraftwerken zur Stromerzeugung
- Schwefelanteil der eingesetzten Kohle und damit direkt zusammenhängend
- Verwendete Entschwefelungstechnologie

Hypothese: Der Stoffstrom Gips aus der Rauchgasentschwefelung von kohlebefeuelten Kraftwerken zur Stromerzeugung wird in den nächsten Jahren kontinuierlich zurückgehen

Die Bruttostromerzeugung in Deutschland betrug im Jahr 1992 537,5 TWh, davon entfielen auf die Steinkohle 29 % (155 TWh), auf Braunkohle 28 % (152 TWh) und auf Atomenergie 30 % (161 TWh). Im Jahr 1998 sank die erzeugte Bruttostrommenge auf 519,8 TWh: der Anteil der Atomenergie stieg auf 33 %, während die Braunkohle auf 26 % (135 TWh) fiel. Der Anteil der Steinkohle blieb unverändert bei 29 %, absolut ein Rückgang auf 150 TWh.

In einer Studie von Prognos⁴²² aus dem Jahr 1995 wurde ein Anstieg der Bruttostromerzeugung um jährlich etwa 0,6 % bis zum Jahr 2010 auf 596,1 TWh, bis 2020 auf 629 TWh prognostiziert. Da jedoch einerseits die Werte 1998 gegenüber 1992 bereits um jährlich 0,6 % zurückgegangen waren, und andererseits angesichts der Liberalisierung des Strommarkts tendenziell weder mit einer Ausweitung noch mit einer intensiveren Nutzung der in Deutschland installierten Kraftwerkskapazität zu rechnen sein dürfte, wird im folgenden davon ausgegangen, dass beginnend ab 1998 die Bruttostromerzeugung in Deutschland um 0,3 % jährlich steigt, was zu einer Energiemenge von 539 TWh in 2010, 555 TWh in 2020 und 572 TWh in 2030 führt.

Die Prognos-Studie geht ferner davon aus, dass bei einem vermuteten Anstieg der Bruttostromerzeugung um 11 % zwischen 1992 und 2010 der Anteil der Stromerzeugung aus Steinkohle um 15 % zunehmen wird, während er für Braunkohle um 2,5 % zurückgeht. Für 2020 wird eine gegenüber 1992 um 21 % höhere Stromerzeugung aus Steinkohle prognostiziert, auch für Braunkohle steigt der Wert um 3 %. Die PreussenElektra geht wiederum von einem sinkenden Anteil für Steinkohle und Braunkohle aus, so wird der Anteil der Steinkohle an der Gesamtstromerzeugung im Jahr 2010 bei 22,7 % gesehen, der entsprechende Braunkohleanteil liegt bei 27,5 %⁴²³. Die Tendenz eines sinkenden Kohleeinsatzes dürfte insbesondere wegen der Liberalisierung der Strommärkte auch über 2010 hinaus weiter anhalten. Dieser Prognose sollte gefolgt werden, da die Stromerzeugung aus Kohle eines der

⁴²² Eckerle et al. (1995)

⁴²³ NLFÖ (1998, S. 35)

teuersten Verfahren zur Stromgewinnung darstellt. Darüber hinaus könnten verstärkte Klimaschutzanstrengungen gerade im Hinblick auf die Ende des ersten Jahrzehnts des neuen Jahrtausends zu erfüllenden Reduktionsziele die Energieerzeugung aus fossilen Energieträgern weiter mindern⁴²⁴. Für die Berechnung zukünftiger REA-Gips-Mengen soll mit folgenden Werten für den Energieträgermix gerechnet werden: im Jahr 2010 entfallen auf Steinkohle und Braunkohle je 23 % der Bruttostromerzeugung, im Jahr 2020 entfallen auf beide Kohleformen noch 20 % der Bruttostromerzeugung⁴²⁵, im Jahr 2030 nur noch 15 %.

Es wird davon ausgegangen, dass spätestens im Jahr 2010 alle mit Stein- und Braunkohle befeuerten Großkraftwerke mit Entschwefelungsanlagen ausgerüstet sind.

Angesichts des zunehmenden Wettbewerbs auf dem Strommarkt sowie der absehbaren Reduzierung der Subventionsleistungen für die Kohlewirtschaft wird in Zukunft der Anteil der Importkohle deutlich zunehmen⁴²⁶. Dies wiederum hat zur Folge, dass der durchschnittliche Schwefelgehalt in der Kohle sinkt, da die deutsche Steinkohle Schwefelanteile zwischen 0,9 % und 1,5 % aufweist. Obwohl die Schwefelgehalte in Steinkohle auch innerhalb eines Landes sehr variabel sein können⁴²⁷, kann davon ausgegangen werden, dass der durchschnittliche Schwefelgehalt von Importsteinkohle lediglich 0,5 % - 0,7 % beträgt. Nach Schätzungen der PreussenElektra wird der Anteil der Importsteinkohle im Jahr 2000 rund 50 % und im Jahr 2010 bereits 75 % betragen. Ab 2020 wird ein Anteil von 90 % angenommen. Von Braunkohleimporten wird nicht ausgegangen, hier wird auch für 2010 und 2020 mit Schwefelgehalten von 0,25 % für rheinische Braunkohle, 0,7 % für Lausitzer Braunkohle und 1,7 % für Braunkohle aus dem Leipziger Becken ausgegangen.

Der zu erwartende Rückgang der Schwefelgehalte hat auch Auswirkungen auf das verwendete Entschwefelungsverfahren. Für Kraftwerke mit einer Leistung von mindestens 200 MW ist angesichts der gegenwärtig hohen Schwefelanteile das Kalkwaschverfahren, bei dem die Rauchgase durch Eindüsen von Kalkstein- oder Branntkalksuspensionen entschwefelt werden, am wirtschaftlichsten. Kraftwerke mit geringerer Leistung setzen heute schon in der Regel das Sprühabsorptionsverfahren oder die Wirbelschichttrocknung als Alternativen ein, bei denen zwar die Investitionen niedriger sind, aber zur Zeit wesentlich höhere Kosten zur Beseitigung der Rückstände (Sprühabsorptionsprodukt, Wirbelschichtasche) anfallen. Bei 95 % der installierten Kraftwerksleistung wird das Kalkwaschverfahren angewendet. Für Kohle mit niedrigen Schwefelanteilen ist das Kalkwaschverfahren nur bedingt geeignet, da aufwändige Nachrüstungen zur Kompensation der zu geringen Schwefelkonzentration getroffen werden müssen⁴²⁸. Es bleibt also abzuwarten, inwieweit zukünftig erforderliche Ersatzinvestitionen in die Rauchgasentschwefelungsanlagen mit dem Ziel der Beibehaltung der Kalkwäsche getroffen werden⁴²⁹, oder ob ein Teil der Großkraftwerke auf andere Verfahren umge-

⁴²⁴ Die Stilllegung von fossil betriebenen Großkraftwerken zur Stromerzeugung wäre eine der wirksamsten Maßnahmen zur Erreichung des Klimaschutzziels, zumal als Alternative der (praktisch) CO₂-freien Stromerzeugung Atomstrom zur Verfügung steht. Andererseits ist auch diese Alternative politisch nicht unumstritten.

⁴²⁵ Der zunächst geringe Rückgang der Braunkohle an der Stromerzeugung liegt in der Inbetriebnahme von zwei neuen Braunkohle-Blöcken in Boxberg und Schwarze Pumpe (4x800 MW). Darüber hinaus werden im Osten auch zwei Steinkohle-Blöcke mit einer Leistung von 500 bzw. 700 MW errichtet.

⁴²⁶ Während die Förderung einer Tonne deutscher Steinkohle rund 280 DM kostet, müssen z.B. für eine Tonne südafrikanischer Steinkohle inklusive Transport nur ca. 80 DM bezahlt werden. Die Förderung deutscher Steinkohle lohnt sich nur wegen der massiven Subventionen in diesen Wirtschaftszweig.

⁴²⁷ Die Schwefelgehalte schwanken zum Beispiel in Indien zwischen 0,5 % und 3 %, auch in den USA gibt es sowohl schwefelarme als schwefelhaltige Steinkohlesorten.

⁴²⁸ Clarke (1993, S. 24): „However, for high ash coals with a low sulphur content, the various forms of fluidised-bed combustion may offer the best combination of plant simplicity and emission control.“

⁴²⁹ Dies hängt im wesentlichen von den Kosten zur Beseitigung der Rückstände ab. Hier könnte das später diskutierte Müller-Kühne-Verfahren einen entscheidenden Impuls setzen (vgl. Kapitel 6.3.4.1).

rüstet wird. Ferner können die Verfügbarkeit und daraus abgeleitet die Kosten sowie die ökologische Beurteilung von Kalk eine Rolle bei der zukünftigen Investitionsentscheidung spielen⁴³⁰. Für die Berechnung wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2010 90 % der installierten Kraftwerksleistung nach dem Kalkwäscheverfahren entschwefelt wird, im Jahr 2020 jedoch nur noch 75 %. Braunkohlekraftwerke werden grundsätzlich zu 95 % entschwefelt.

Im folgenden werden nochmals die Annahmen zu den Einflussfaktoren zusammengefasst:

- Entwicklung der Bruttostromerzeugung in Deutschland: Steigerung um 0,3 % p.a.
- Künftiger Energieträgermix zur Bruttostromerzeugung: z.Zt. Steinkohle 29 %, Braunkohle 26 %; in 2010 beide 23%; in 2020 beide 20 %; in 2030 beide 15 %
- Anteil Importkohle bei Steinkohle: 1998: 45 %, 2010: 75 %; 2020: 90 %; 2030: 90 %
- Grad der Entschwefelung von Kohlekraftwerken zur Stromerzeugung: ab 1998 100 %
- Schwefelanteil der eingesetzten Kohle: Braunkohle konstant im Mittel 0,6 %; Steinkohle Deutschland: 0,97 %; Steinkohle Import: 0,5 %
- Verwendete Entschwefelungstechnologie: Steinkohlekraftwerke Kalkwäsche: 1998 95 %; 2010: 90 %, 2020: 75 %, 2030: 75 %; Braunkohlekraftwerke Kalkwäsche: 1992: 30 %, 1998: 90 %; ab 2010: 95 % konstant

Die Berechnung ist letztendlich noch abhängig vom Heizwert der jeweils eingesetzten Kohle, je niedriger der Heizwert der Kohle ist, desto höher wird der REA-Gips-Anfall sein. Für die Prognose wurde der Heizwert allerdings als konstant angenommen.

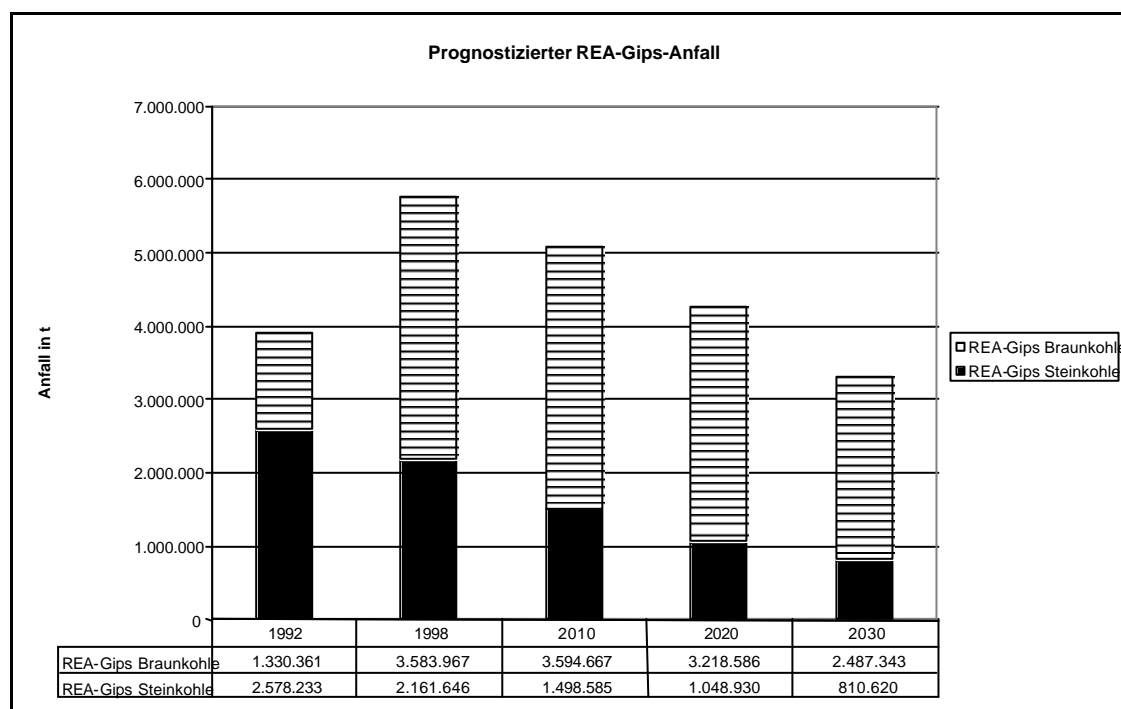


Abbildung 6.2: Prognose des REA-Gips-Anfalls in Deutschland bis 2030⁴³¹

⁴³⁰ Pro Tonne REA -Gips werden etwa 0,6 t Kalk eingesetzt (Wirsching, 1985, S. 140). Daraus ergeben sich für Deutschland im Jahr 1998 etwa 3,5 Mio. t Kalk. Auch dies stellt ähnlich wie Gips einen erheblichen ökologisch relevanten Stoffstrom dar.

⁴³¹ Die Berechnung der spezifischen REA -Gips-Werte wurde mit dem Programm GEMIS von Fritsche et al. (1997) durchgeführt.

Unter der Annahme der Gültigkeit der Prämissen kann die Hypothese bestätigt werden, wonach die REA-Gips-Mengen aus der Rauchgasentschwefelung von Kohlekraftwerken in Deutschland ihr Maximum mittlerweile erreicht haben und eine rückläufige Tendenz aufweisen. Insbesondere der REA-Gips aus Steinkohle wird aufgrund des rasch zunehmenden Einsatzes von Importkohle stark rückläufig sein. Dies wird auch Konsequenzen auf die Gipsindustrie haben, die sich um die Steinkohlekraftwerke herum etabliert hat; für ihre Rohstoffversorgung werden schon in nächster Zeit größere Transportaufwendungen für Gips aus Braunkohlekraftwerken oder Naturgipsstätten erforderlich werden. Da diese Werke in dicht besiedelten Gebieten stehen, käme alternativ auch eine verstärkte Nutzung von Gipsen aus Gebäudeabbrüchen in Frage.

Bleibt die Nachfrage nach Gipsprodukten in den kommenden Jahren konstant auf dem Niveau von 1995 bei etwa 8,8 Mio. t (1997 wurden sogar 9,7 Mio. t abgesetzt), so entsteht schon bald eine Deckungslücke in der Versorgung. Substitutionsmöglichkeiten bestehen dabei in folgenden Alternativen:

- vermehrter Einsatz von deutschem Naturgips. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Realisierbarkeit dieser Option diskutiert werden
- Import von Naturgips vornehmlich aus Spanien⁴³²
- Import von REA-Gips aus Osteuropa⁴³³
- verstärkter Einsatz von Abfallgipsen aus dem Bauwesen. Die Modellrechnung für die 2009 anfallenden Abfallgipsmengen prognostiziert 700.000 – 800.000 t pro Jahr in den günstigen Dispersionsgraden 1-5, die relativ problemlos als Ersatz für den ausfallenden REA-Gips zur Verfügung stehen könnten⁴³⁴. Legt man einen spezifischen Frachtkostensatz von 0,25 DM/tkm zu Grunde⁴³⁵ und nimmt eine durchschnittliche Entfernung zum Transport von Importgips von 600 km an, so stünde theoretisch ein Potenzial von ca. 100 Mio. DM (150 DM/t) jährlich zur Verfügung, um den Gips mit niedrigen Dispersionsgraden, aus dem Baubereich insbesondere Vollgipsplatten und Gipskartonplatten, wieder in den Kreislauf zurückzuführen.

Der Argumentation der Gipsindustrie, weitere Kapazitäten zur Verarbeitung von REA-Gips zu Gipsprodukten aufzubauen, kann also nicht gefolgt werden. Es sollte im Gegenteil an den Produktionsstandorten der Gipsprodukte eine Planung durchgeführt werden, wie die Versorgung mit Rohstoffen in den nächsten Jahren möglichst kostengünstig sichergestellt werden kann. Ferner sollten REA-Gips-Exporte, die aufgrund langfristiger vertraglicher Bindungen gegenwärtig noch nach Skandinavien und Großbritannien durchgeführt werden, baldmöglichst eingestellt werden.

⁴³² Die Möglichkeit des Naturgipsimports wird von Seiten des UBA abgelehnt: „Auch von Seiten des Naturschutzes wird die Möglichkeit von Naturgipsimporten aus dem Ausland (Spanien, Marokko, Irland) unreflektiert in die Diskussion gebracht. Ohne konkret einen Überblick über die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen des Gipsabbaus anderenorts und der erforderlichen Massenguttransporte zu haben – von Kosten-Nutzen-Überlegungen ganz abgesehen – kann diese Lösungsvariante nicht vertreten werden. [...] Bezogen auf die Transportfolgen bezieht sich diese Position auch auf mögliche Importe von REA-Gips“. (Günnewig/Riedl, 1998, S. 89)

⁴³³ In Tschechien wurden 1996 430.000 t REA-Gips erzeugt, Entschwefelungsanlagen für weitere 600.000 t/a sind in Bau bzw. in Planung. In Polen wurden 1996 rund 500.000 t erzeugt. Erste Projekte beginnen auch in Russland und der Ukraine. (Hamm, 1994, S. 448 f.)

⁴³⁴ Grundsätzlich wird Gips auch bei der Entschwefelung von nicht-kohlebetriebenen Feuerungsanlagen anfallen, insbesondere aus Müllverbrennungsanlagen. Die Eigenschaften und Zusammensetzung dieses Gips sowie seine Eignung zum Einsatz im Bauwesen muss allerdings noch umfangreichen Untersuchungen unterzogen werden.

⁴³⁵ VGB Kraftwerkstechnik (1986, S. 382), Valdivia (1995, S. 264)

6.1.1.2 VERÄNDERUNG IM NATURGIPSANGEBOT

Es gibt bis heute keine zuverlässigen und verlässlichen Schätzungen über die Höhe der Naturgipsvorkommen in Deutschland. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe kann zur allgemeinen Vorratssituation aufgrund der nicht abschätzbaren Genehmigungspraxis keine Angaben machen. Die Umweltbehörden der Länder wurden allerdings schon 1992 dazu veranlasst, eine restriktive Behandlung von Abbaugenehmigungen für Naturgips vorzusehen. So wird etwa vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung eine Erschließung neuer Abbaugebiete in Niedersachsen nicht befürwortet, auch wenn dies zu gravierenden Änderungen in der Struktur der niedersächsischen Gipsindustrie führen wird⁴³⁶.

Ferner liegen von statistischer Seite keine verlässlichen Angaben über die Mengen des in Deutschland geförderten Naturgipses vor, da aufgrund der Struktur der Rohstoffindustrie (wenige Marktteilnehmer sowie Mitarbeiterzahl zum Teil < 20, weswegen der Betrieb statistisch nicht erfasst wird) die Daten geheimgehalten werden. Auch vom Bundesverband der Gipsindustrie gibt es hierzu nur Differenzberechnungen, die die zwischen Verbrauch und Angebot technischer Gipse entstehende Lücke als Menge der Naturgipsproduktion kennzeichnet. Informationen über Förderkosten sind von keiner Stelle zu erhalten.

Aufgrund der bisher vergebenen Abbaugenehmigungen für Gips in der Südharzregion dürften die dortigen Vorräte in etwa 20-25 Jahren erschöpft sein. Durch Nutzung von Abbaumöglichkeiten in Thüringen könnte noch eine Verlängerung um weitere 10-15 Jahre möglich sein, da sich hier eine Reihe von bergbaurechtlichen Erlaubnissen in privater Hand befinden. Über die in Unterfranken sowie auf der Schwäbischen Alb und im Saarland befindlichen Gipsreserven sind keine Schätzungen über ihre Größenordnung bekannt.

Hypothese: Die verfügbaren Naturgipsreserven sind begrenzt und können ab 2030 die Versorgung für die Herstellung von Gipsprodukten nicht mehr gewährleisten.

Die Angaben über bestehende Reserven sind aufgrund der unterschiedlichen Reinheit und der ggf. möglichen Einbeziehung von Anhydrit in die Produktion nur im konkreten Einzelfall verwendbar. Insgesamt geht Roskill für Westeuropa von Gipsreserven ohne Einbeziehung von Anhydrit in Höhe von ca. 800 Mio. t aus⁴³⁷. Die in Westeuropa lagernden Gipsreserven befinden sich im wesentlichen in Spanien, auch sind Vorräte in Frankreich, Irland, Italien, Österreich sowie Deutschland vorhanden. Im folgenden wird Roskill gefolgt und angenommen, dass 20 % der geschätzten Gipsreserven Westeuropas in Deutschland liegen.

Es wird ferner angenommen, dass die geschätzten Gipsreserven ggf. nur zu einem Teil abgebaut werden. Infolge der umfangreichen Studien über den südniedersächsischen Gipsabbau und der hierbei ausgesprochenen Empfehlungen im Hinblick auf eine mittelfristige Beendigung des großflächigen Gipsabbaus in 30 Jahren⁴³⁸ wird von Abbaugraden von 60 %, 80 % und 100 % ausgegangen.

⁴³⁶ In einer gutachtlichen Stellungnahme des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung vom 02.09.92 heisst es: „Die erschlossenen Vorräte reichen bei den Firmen mit den geringsten Vorräten noch 10 bis 15 Jahre. Dann muss eine Entwicklung einsetzen, die durch eine Zerteilung gekennzeichnet sein wird. Zum einen werden die Firmen verstärkt auf Lagerstätten in Thüringen zurückgreifen müssen, zum anderen wird dann eine Abwanderung in die niedersächsische Küstenregion bzw. in die Niederlande zu beobachten sein. Dort können die Werke dann entweder mit REA-Gipsen aus niederländischen Kraftwerken oder mit Importgipsen aus dem mediterranen Raum versorgt werden. Dadurch dürfte sich aber die gesamte Marktstruktur grundlegend ändern. In spätestens 30 bis 40 Jahren muss nahezu der gesamte Industriezweig verlagert worden sein.“ (zitiert in Günnewig/Riedl, 1998, S. 93)

⁴³⁷ Roskill (1997)

⁴³⁸ vgl. Günnewig/Riedl (1998, S. 239). Der hochwertige Gips des Südharzes soll dann nur noch für Spezialgipsanwendungen als Modellformen- und Dentalgips abgebaut werden.

Naturanhydrit liegt im Vergleich zu Gips zwar in wesentlich größeren Mengen vor, er spielt jedoch für die Produktherstellung nur eine sehr untergeordnete Rolle, weswegen er in dieser Betrachtung nicht weiter berücksichtigt wird (einige unter Tage gewonnene hochklassige Qualitäten eignen sich für Fliessestrich, auch bestehen niederwertige Anwendungen bei der Zementherstellung und als Stabilisat bei Verfüllungen).

Abbaugrad Jährl. Gewinnung	60 %	80 %	100 %
1 Mio. t	96	128	160
2 Mio. t	48	64	80
3 Mio. t	32	43	53
4 Mio. t	24	32	40
5 Mio. t	19	26	32

Tabelle 6.2: Reichweite der deutschen Naturgipsvorkommen in Jahren in Abhängigkeit von Abbaugrad und konstanter jährlicher Gewinnungsmenge; Basis Gipsreserven = 160 Mio. t

Die Tabelle 6.2 zeigt, dass bei einer Beibehaltung der 1995 geförderten Naturgipsmengen von 4,7 Mio. t die Vorräte bereits im Jahr 2030 erschöpft wären und nicht mehr zur Deckung des Bedarfs herangezogen werden könnten. Dies würde zwangsläufig auch schon deutlich vor dem Jahr 2030 zu einer marktlichen Verteuerung von Naturgips führen, da

- die Gewinnung jeder zusätzlichen Tonne aus einer Lagerstätte in der Regel teurer, aber mindestens genauso teuer ist wie die letzte gewonnene Tonne
- als Reaktion hierauf der Ersatz durch alternative Versorger, etwa durch Import von Naturgips, einsetzen würde, wobei erhebliche Transportkosten anfallen. Es werden hierbei zunächst diejenigen Gipsmengen ersetzt, die von Seiten der Kosten und der Qualität am besten geeignet sind

Abbaugrad % Gewinnung von Reserven	60 %	80 %	99 %
1,5 %	61	106	305
2 %	45	80	228
2,5 %	36	64	182
3 %	30	53	151

Tabelle 6.3: Reichweite der deutschen Naturgipsvorkommen in Jahren in Abhängigkeit von Abbaugrad und prozentualer jährlicher Gewinnungsmenge

Ausgehend von einer angenommenen Reserve von 160 Mio. t zeigt Tabelle 6.3 die Reichweiten bei einem angenommenen prozentualen Abbau der insgesamt verfügbaren Ressource. Der Vorteil der Annahme eines prozentualen Abbaus liegt darin, dass steigende Förderkosten und Substitutionseffekte aufgrund des zunehmenden Rückgangs der Ressource berücksichtigt werden können. Nachteilig wirkt sich aus, dass andere Einflussfaktoren wie die Entwicklung der Nachfrage nur unzureichend berücksichtigt werden können.

Bei dieser Betrachtung ist selbst unter der Annahme einer 3% Ausschöpfung pro Jahr im Jahr 2010 die Fördermenge auf 3,6 Mio. t zurückgegangen, im Jahr 2020 auf 2,6 Mio. t und

im Jahr 2030 auf 1,9 Mio. t jährlich. Wird die Ressource zu 2,5 % genutzt, liegt die Förderhöhe im Jahr 2010 bei 3,1 Mio. t jährlich, um dann über 2,4 Mio. t im Jahr 2020 auf 1,9 Mio. t 2030 abzusinken. Auch bei einer Ausnutzung von 2 % liegt die Fördermenge im Jahr 2030 bei rund 1,8 Mio. t in einer ähnlichen Größenordnung gegenüber 2,6 Mio. t im Jahr 2010.

Nimmt man den Bedarf an Gips aus dem Jahr 2000 in Höhe von 8,8 Mio. t als konstant an und setzt ferner voraus, dass 1 Mio. t hiervon durch Naturanhydrit und technischen Anhydrit gedeckt werden kann (Einsatz als Fliessestrich und ggf. in der Zementindustrie), muss ein Bedarf von 7,8 Mio. t befriedigt werden. Der Export wird ab dem Jahr 2000 als 0 angenommen, da die Lieferverpflichtungen für REA-Gips entfallen sind. Bei einer jährlichen Produktionsmenge von Gipsstein von 3 Mio. t ergibt sich folgende Bilanz:

		2000	2010	2020	2030
Naturgips		3.500	3.500	3.500	3.500
	Gipsstein	3.000	3.000	3.000	3.000
	Anhydrit	500	500	500	500
Techn. Gips		6.250	5.700	4.870	3.910
	REA-Gips Steinkohle	1.800	1.500	1.050	810
	REA-Gips Braunkohle	3.850	3.600	3.220	2.500
	Flusssäureanhydrit				
	Citronensäuregips	600	600	600	600
Summe Angebot		9.750	9.200	8.370	7.410
Nachfrage⁴³⁹ + Export		9.340	8.800	8.800	8.800
Saldo		+ 400	+ 400	- 430	- 1.400

Tabelle 6.4: Angebots-/Verbrauchsstruktur bei jährlicher Fördermenge von 3 Mio. t Naturgips, Angaben in 1000 t

Etwa ab dem Jahr 2014 entsteht also eine Unterdeckung. Ferner ist zu berücksichtigen, dass bei einem jährlichen Abbau von 3 Mio. t Naturgips die Lagervorräte ab dem Jahr 2030 erschöpft sind.

Wenn eine ressourcenschonende Gipsproduktion aufgebaut werden soll, die sich durch moderate und qualitätsorientierte Verwendung von Naturgips auszeichnet, entsteht die Deckungslücke bereits in den kommenden Jahren, da das Angebot schrittweise reduziert wird. Zur Substitution stehen hier die gleichen Möglichkeiten zur Verfügung, die bereits im Rahmen der Diskussion der zurückgehenden REA-Gipsmenge erwähnt wurden.

⁴³⁹ Nachfrage entspricht dem prognostizierten Verbrauch im Jahr 2000

		2000	2010	2020	2030
Naturgips		3.500	2.560	2.270	2.000
	Gipsstein	3.000	2.060	1.770	1.520
	Anhydrit	500	500	500	500
Techn. Gips		6.250	5.700	4.870	3.910
	REA-Gips Steinkohle	1.800	1.500	1.050	810
	REA-Gips Braunkohle	3.850	3.600	3.220	2.500
	Flusssäureanhydrit				
	Citronensäuregips	600	600	600	600
Summe Angebot		9.750	8.260	7.140	5.900
Nachfrage + Export		9.340	8.800	8.800	8.800
Saldo		+ 400	- 500	- 1.700	- 2.900

Tabelle 6.5: Angebots-/Verbrauchsstruktur bei jährlicher Fördermenge von 1,5 % der vorhandenen Naturgipsreserven, Angaben in 1000 t

Da Gips ein in überschaubaren Zeiträumen nicht erneuerbares Wirtschaftsgut und Naturgut darstellt, folgt aus dem Verständnis einer zukunftsorientierten nachhaltigen Entwicklung die generelle Forderung, diese Ressource sparsam zu nutzen, bis eine möglichst weitgehende Substitution durch andere Rohstoffe erfolgen kann. Es ist also zwingend geboten, das Tempo des Abbaus von Naturgips zu reduzieren. Hierzu sollten folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Verknappung des Flächenangebots für den Gipsabbau durch frühzeitige Ausarbeitung eines mittel- bis langfristigen regionalen Gesamtkonzepts, insbesondere keine Ausweisung weiterer Abbaurechte mehr (ordnungspolitische Maßnahme)
- Begrenzung des Naturgipsabbaus auf eine Menge, die erforderlich ist, um qualitativ hochwertige Verwendungen im Modellformen- und Dentalbereich abzudecken. Dieser Abbau kann an einigen wenigen ausgewählten Standorten erfolgen, an denen jetzt schon Abbau betrieben wird
- Beschleunigte Entwicklung von technisch-logistischen Verfahren zur Gewinnung von Gips aus Abfällen. Abfallströme in günstigen Dispersionsgraden, die eine leichte Kreislaufführung ermöglichen, sind in hinreichendem Maße verfügbar
- Erhebung einer Rohstoffabgabe oder einer Ressourcensteuer auf abgebauten Naturgips bei den abbauenden Betrieben, um den Abbau zu verlangsamen und die Entwicklung von Alternativen zu beschleunigen (ökonomische Steuerungsmaßnahme).

Eine derartige Rohstoffabgabe wird in Baden-Württemberg von Steine- und Erdenbetrieben beim Abbau von Sand und Kies in einer Größenordnung von 0,30 DM/t – 1,00 DM/t erhoben, um einen Ausgleich für ihren Natureingriff zu schaffen. Gleichzeitig handelt es sich bei dieser Abgabe um ein umweltökonomisches Instrument zur Forcierung der Verwendung von Recyclingmaterialien. Valdivia stellte allerdings fest, dass die Lenkungswirkung dieser Abgabe bei der angesetzten Höhe nicht vorhanden ist, sondern erst bei einer Höhe ab etwa 13 DM/t

Substitutionseffekte nachweisbar⁴⁴⁰ sind. Dies käme angesichts von Durchschnittspreisen von 10 – 20 DM/t für Kies- und Sandprodukte praktisch einer Verdoppelung der Preise gleich.

Umweltökonomische Instrumente sind jedoch immer kritisch zu hinterfragen, insbesondere im Hinblick auf ihre sozioökonomischen Wirkungen. Zum einen zeigt sich im Fall von Sand und Kies der Versuch einer Zweckentfremdung einer für die Renaturierung vorgesehenen Abgabe für andere Einsatzgebiete, zum anderen muss selbst bei Erhebung einer zweckun- gebundenen Steuer mindestens eine Verdoppelung der Rohstoffpreise erfolgen, um die er- hoffte Lenkungswirkung zu erzielen⁴⁴¹. Dies stellt wiederum einen Eingriff in den Markt dar, insbesondere haben derartige Maßnahmen erhebliche Auswirkungen auf die rohstoffför- dernde Industrie und die eng mit ihr zusammenhängende rohstoffverarbeitende Industrie, die sich relativ unvermittelt einem deutlichen Wettbewerbsnachteil gegenüber sähen. Zudem sind Ressourcensteuern auch aus strukturpolitischer Sicht heraus kritisch zu beleuchten, da sich der Rohstoffabbau häufig in strukturschwachen Regionen vollzieht. Jüttner unterstützt diese kritische Position, für ihn kommt unter den mineralischen Rohstoffen allenfalls Kupfer für eine Abgabe in Betracht, obwohl auch hier die Probleme einer schwierigen Bemessung sowie einer Substitution durch synthetische Stoffe vorliegen⁴⁴².

Für den Naturgipsabbau wird daher auf die modellhafte Abbildung der Einführung eines um- weltökonomischen Lenkungsinstrumentariums in Form einer Ressourcensteuer verzichtet, zumal Kostendaten nur ungenügend bekannt sind. Statt dessen ist die Formulierung ord- nungspolitischer Rahmenbedingungen vorzuziehen, um in einer mittel- bis langfristigen Per- spektive den Naturgipsabbau zu reduzieren.

6.1.2 Veränderung der Nachfrage

In Kapitel 4.2.2.1 wurden bereits einige Grundzüge der Erstellung von Bedarfsprognosen dargelegt. Dabei wurden auf einer makroökonomischen-langfristigen Ebene drei Effekte identifiziert, die den Verlauf des Bedarfs nach einem Gut oder einer Dienstleistung zur Be- dürfnisbefriedigung dokumentieren:

- Ersatznachfrage
- Bevölkerungsnachfrage
- Ausstattungsnachfrage

Auf der makroökonomisch-mittelfristigen Ebene müssen jene Einflussfaktoren mit betrachtet werden, die im Zusammenhang mit der Entwicklung einer Volkswirtschaft stehen, etwa die Entwicklung des Bruttosozialprodukts, der angenommene Beschäftigungsgrad und daraus abgeleitet das verfügbare Einkommen der Nachfrager, die Sparquote sowie der Raumbedarf von Betrieben. Da diese Faktoren nicht beeinflussbar sind, ohnehin indirekt in der Ausstat- tungsnachfrage enthalten sind und auch nur mittelbaren Bezug zur Veränderung der Nach- frage nach Gipsprodukten besitzen, werden sie nicht weiter explizit betrachtet.

Daneben existiert auch eine mikroökonomische Perspektive der Nachfrageprognose. Sie untersucht den Entscheidungsprozess des Nachfragers über Annahme oder Ablehnung ei-

⁴⁴⁰ vgl. Valdivia Mercado (1995, S. 205)

⁴⁴¹ vgl. Spengler, der die Einführung von Ressourcensteuern in Höhe von 100 % bzw. 200 % auf mineralische Naturrohstoffe diskutiert. (Spengler, 1994, S.137)

nes Guts. Sowohl ökonomische Faktoren wie diejenigen der makroökonomisch-mittelfristigen Ebene und Preise von anderen Produkten mit gleicher Nutzenerfüllung als auch außerökonomische soziologische und psychologische Faktoren wie Motivation, Erwartungen und Einstellungen sind zu berücksichtigen⁴⁴³. Im Hinblick auf die folgende Betrachtung für Gipsprodukte wird vor allem der Auswahlprozess bei Vorliegen von Substituten betrachtet werden, wobei davon ausgegangen wird, dass die Nachfrager sich für das Gut entscheiden, bei dem bei vergleichbarer Qualität die Kosten minimal sind.

Hypothese: Die Nachfrage nach Gipsprodukten geht bis 2030 leicht zurück. Der Outputstrom wird etwa zwischen 2020 und 2030 stärker werden als die Nachfrage

Um das Ausmaß des Ersatzbaus für die folgende Modellrechnung zu schätzen, wird angenommen, dass die Funktionalität, die durch den Abgang von Baumaterialien aus dem Baubestand verloren gegangen ist, auch wieder ersetzt wird. Das drückt aus, dass z.B. Ersatz für eine im Jahr 2028 abgehende Gipskartonplatte geleistet wird, aber nur insofern, dass erneut eine nichttragende Innenwand errichtet wird. Die Auswahl des Baustoffs vollzieht sich auf der mikroökonomischen Ebene anhand der Kosten. Eine feinere Differenzierung der Ersatzraten nach einzelnen Renovationszyklen und Produkten wäre zwar möglich, wird aber an dieser Stelle nicht angestellt, da aufgrund der herrschenden Datenungenauigkeiten eine zusätzliche Komplexität nicht hilfreich erscheint⁴⁴⁴.

Das sich durch zunehmende Bevölkerung ergebende Bauvolumen wird gleich Null angenommen, da von einer Stagnation der Bevölkerung über den Betrachtungszeitraum ausgegangen wird.

Die Ausstattungsnachfrage zur Abdeckung des steigenden Bedarfs in der Bevölkerung wird durch die vermutete Entwicklung der spezifischen Kennziffer Wohnflächenbedarf je Einwohner abgebildet. Die Entwicklung dieses Werts ist abhängig von der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung im Prognosezeitraum sowie den individuellen Nutzerpräferenzen. Zur Abschätzung werden Werte der Vergangenheit herangezogen und unter Berücksichtigung des bereits erreichten hohen Standards (Sättigungseffekt) als leicht nach unten korrigierter Trend für die Zukunft fortgeschrieben. In Westdeutschland betrug der jährliche Zuwachs an Wohnfläche zwischen 1978 und 1987 0,51 m²/Einwohner, zwischen 1987 und 1993 0,34 m²/Einwohner, um 1994 bei einem Wert von 38 m²/Einwohner zu liegen. Dies entspricht einem Gesamtwert von 2431 km². In Ostdeutschland beträgt der Durchschnittswert 32m²/Einwohner, zusammen 566 km². Als Trend für die zukünftige Entwicklung wird für die Jahre 2000-2010 im Westen ein Zuwachs von jährlich 0,25 m²/Einwohner angenommen, ab 2010 0,20 m²/Einwohner, ab 2020 noch 0,15 m²/Einwohner und ab 2030 noch 0,10 m²/Einwohner. In Ostdeutschland wird der Zuwachs bis 2010 bei 0,5 m²/Einwohner geschätzt, anschließend bei 0,4 m²/Einwohner ab 2010, ab 2020 bei 0,3 m²/Einwohner. Ab 2030 wird die gleiche Entwicklung wie in Westdeutschland erwartet⁴⁴⁵. Dies führt zu den Durchschnittswerten 0,3 m²/Einwohner zwischen 2000 und 2010, 0,24 m²/Einwohner zwischen 2010 und 2020, 0,18 m²/Einwohner zwischen 2020 und 2030 sowie 0,10 m²/Einwohner ab 2030. Für den Nichtwohnbau wird ein jährliches Wachstum der Nutzfläche

⁴⁴² vgl. Jüttner (1993, S. 139)

⁴⁴³ Plassmann nennt die ökonomischen Faktoren auch diejenigen der Kauffähigkeit und die außerökonomischen Faktoren diejenigen der Kaufwilligkeit. (Plassmann, 1964)

⁴⁴⁴ Beispiel einer zusätzlichen Differenzierung ist die Berücksichtigung der Tatsache, dass eine Gipskartonplatte bei Modernisierungen zu 100% funktionell ersetzt wird, bei Sanierungen jedoch nur zu 80 %, weil kein Bedarf für die Wand mehr vorliegt.

⁴⁴⁵ zu Zahlenwerten und Prognosen vgl. Statistisches Bundesamt sowie BBR (1998, S. 16)

von 0,25 % erwartet, was angesichts einer sich verändernden Arbeitswelt durch intensivere Nutzung der Kommunikationstechnik und damit einhergehender stärkerer Verbindung von Wohnen und Arbeiten („Home-Office“) eher die Obergrenze darzustellen scheint.

Zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Ausstattungsnachfrage auf Gipsprodukte wird folgende Vorgehensweise gewählt: der Zuwachs an Wohnfläche etwa im Jahr 1995 wird mit dem Absatz an Gipsprodukten in diesem Jahr abzüglich der abgegangenen Mengen verknüpft, da diese ja im Rahmen der Ersatznachfrage berücksichtigt sind. Dies führt im Jahr 1995 zu einer Menge von 7,4 Mio. t für einen Zuwachs an Wohnfläche von 28,2 km² Wohnraum und etwa 7 km² Nutzfläche in Nicht-Wohngebäuden entsprechend einem Mittelwert von 0,21 t/m². Dieser Wert erscheint plausibel im Hinblick auf die Schätzungen des spezifischen Baustoffinhalts von Gebäuden⁴⁴⁶ und der Annahme, dass 1995 etwa 5 % der in den Hochbau eingeflossenen Baustoffe Gips waren. Für die Prognose wird für Wohnbauten ein Wert von 0,2 t/m² Wohnfläche angenommen, für Nichtwohnbauten 0,15 t/m² Nutzfläche.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass dieses Szenario der steigenden Ausstattungsnachfrage nicht grundsätzlich zwingend ist. So reklamieren Gießhammer/Buchert auch eine verstärkte Suffizienz der Nachfrager nach Wohnraum, indem sie mittelfristig eine Stabilisierung, langfristig eine Verringerung des durchschnittlichen Pro-Kopf-Bedarfs fordern. Ansatzpunkte hierzu sehen sie hauptsächlich in soziologischen Innovationen etwa durch Förderung flexiblerer und kommunikativerer Wohnmodelle, einer stärkeren Durchmischung von Wohnen und Arbeit sowie durch eine Prioritätenverschiebung weg vom Einfamilienhaus hin zu Mehrfamilienhäusern⁴⁴⁷. Suffizienzparameter werden bei der Modellrechnung nicht mit aufgenommen, da sie einen umfangreichen Wertewandel in der Bevölkerung voraussetzen, der auch auf die Art unseres Wirtschaftslebens, das bislang auf Wachstum und Expansion ausgelegt ist, erheblichen Einfluss besitzt. Dennoch liegen in der Suffizienz noch erhebliche Potenziale für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft⁴⁴⁸.

Die Berechnung der prognostizierten Werte unter Zugrundelegung der makroökonomischen Prognoseparameter für Ersatz- und Ausstattungsbau zeigt zunächst Erstaunliches: entgegen der Hypothese wächst der Bedarf an Gips in den nächsten Jahrzehnten anstatt zu sinken, obwohl alle Trendparameter für den Ausstattungsbau nach unten zeigen. Der Grund für den steigenden Bedarf liegt jedoch nicht mehr im Ausstattungsbau, wie dies noch in den vergangenen Jahrzehnten der Fall war, sondern im Ersatzbau. Nimmt man nämlich an, dass alle Stoffe, die als Bauschutt das Stofflager Bauwesen verlassen, ersetzt werden und damit auch alle Bauten und, im Falle von Modernisierungen oder Sanierungen, auch alle Funktionalitäten der Bauten, muss der ausgebrachte Stoffstrom natürlich auch wieder eingebracht werden, wenn das vorherige Niveau der Bedürfnisbefriedigung nicht unterschritten werden soll. Ein geringerer Inputstrom ist allenfalls dann möglich, wenn in Zukunft leichter gebaut wird, das heißt, dass das spezifische Baumassengewicht pro Einheit (also etwa m² Wohn- oder Nutzfläche oder m³ Bruttorauminhalt) sinkt.

⁴⁴⁶ vgl. Kapitel 5.3.2

⁴⁴⁷ Gießhammer/Buchert (1996, S. 36)

⁴⁴⁸ vgl. Schmidt-Bleek (1994). Die Suffizienz trägt hier neben der Effizienz entscheidend zur Erreichung der formulierten Ziele bei.

	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Parameter:						
Zuwachs an Wohnfläche p.a. in m²/Einwohner	0,30	0,30	0,24	0,18	0,10	0,10
Zuwachs an Nichtwohngebäude p.a., bezogen auf den Bestand 1995 (1.534 Mio. m²)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
Bevölkerung in Mio	82.000.000	82.000.000	82.000.000	82.000.000	82.000.000	82.000.000
Relation (Gips/m² Wohnfläche)	0,25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Relation (Gips/m² Nutzfläche)	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Substitution durch andere Baustoffe	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Berechnung des Gipsbedarfs:						
Ersatzbau [t]	1.739.077	2.678.443	4.039.028	5.766.928	7.378.503	8.436.294
Ausstattungsbau Wohngeb. [t]	6.150.000	4.920.000	3.936.000	2.952.000	1.640.000	1.640.000
Ausstattungsbau Nichtwohngeb. [t]	613.600	575.250	575.250	575.250	575.250	575.250
Gipsbedarf [t]	8.502.677	8.173.693	8.550.278	9.294.178	9.593.753	10.651.544
Berechnung des Gipsangebots:						
Angebot Naturgips D [t]	3.000.000	2.588.487	2.114.982	1.728.094	1.411.979	1.153.690
Angebot REA-Gips [t]	5.745.612	5.093.253	4.267.516	3.297.963	3.342.564	3.444.205
Anhydrit / chemische Gipse [t]	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000
abzüglich Export [t]	-630.000	0	0	0	0	0
Gipsangebot [t]	9.215.612	8.781.739	7.482.498	6.126.057	5.854.542	5.697.895
Saldo	712.936	608.047	-1.067.780	-3.168.121	-3.739.211	-4.953.650

Tabelle 6.6: Prognose des Gipsbedarfs 2000-2050 nach rechnerischen Kennwerten, Angaben in t

Die Tabelle 6.6 zeigt, dass der Gipsbedarf in eine Größenordnung wächst, die bislang noch nicht erreicht wurde. Angesichts der sinkenden Angebote von Primärrohstoff entstehen somit erhebliche Deckungslücken. Während die Nachfrage nach Gips kontinuierlich steigt, geht das Angebot laufend zurück, so dass etwa im Jahr 2030 bereits eine Deckungslücke von 3,5 Mio. t besteht. Selbst mit einer 100 %-igen Verwertung von Abfallgipsen in günstigen Dispersionsgraden bis hin zu 6 ist dieses Defizit nicht auszugleichen, da dieser Abfallstrom nur etwa 2,2 Mio. t beträgt.

Es kann jedoch sein, dass auf der mikroökonomischen Ebene der Entscheidung der Nutzer sich eine Verschiebung des Nachfrageverhaltens einstellt. Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn für die gleiche Funktionserfüllung ein Substitutionsprodukt zur Verfügung steht, das von den Nutzern präferiert wird. Rationales, ökonomisches Verhalten im Sinne der Kostenminimierung bei gleicher Qualität vorausgesetzt, ergeben sich sogenannte Indifferenzpreise eines Rohstoffs als oberste Preisgrenze, bis zu der die Abnehmer bereit sind, für einen Rohstoff zu bezahlen. Überschreiten die Ist-Marktpreise des Rohstoffs jene Preisgrenze, wird das Substitut gewählt⁴⁴⁹.

Eine derartige Überlegung stellt Valdivia an, wenn sie die Substitutionspotenziale für natürliche Rohstoffe durch Recyclingstoffe berechnet⁴⁵⁰. Sie argumentiert, dass bei Vorliegen eines Substituts letztendlich der die Qualität reflektierende Preis über die Aufteilung des Marktvolumens zwischen Rohstoff und Substitut entscheidet. So sind die Nachfrager bereit, bei Vor-

⁴⁴⁹ vgl. BBR (1986, S. 160)

⁴⁵⁰ Valdivia (1995, S. 135)

liegen einer hohen Qualität einen bestimmten Rohstoff zu wählen, obwohl dessen Preis, ggf. aufgrund der Knappheit, höher liegt. Eine Reihe von Funktionserfüllungen ist jedoch auch mit Baustoffen geringerer Qualität möglich, weswegen die Preisbereitschaft abnimmt und letztendlich unter den Indifferenzpreis sinkt. Für diese Menge wird das Substitut gewählt. Beispiele für eine derartige Substitution sind etwa Zementestrich gegenüber Anhydritestrich, Kalkputz gegenüber Gipsputz oder Gipskartonplatten gegenüber Porenbetonsteinen zur Erstellung von nichttragenden Innenwänden. Die Wahl fällt auf eine dann teurere Gipskartonplatte, wenn spezifische Eigenschaften des Baustoffs Gips wie Feuersicherheit gefragt sind. Ist dies nicht der Fall, nimmt die Preisbereitschaft ab und das Substitut wird gewählt. Ebenfalls denkbar ist der Einsatz nachwachsender Rohstoffe zur Funktionserfüllung, etwa die Produktion von Strohplatten zur Erstellung von Innenwänden oder der Einsatz von Holz oder Lehm.

Die sich letztendlich einstellenden Substitutionspotenziale sind nur sehr schwer abzuschätzen, da sie von der exogen stattfindenden Preisbildung auf dem Markt determiniert werden. Bei Betrachtung des Verbraucherverhaltens vor Einsetzen des Gipsbooms Ende der 80er Jahre hat sich aber gezeigt, dass zumindest eine Akzeptanz gegenüber Substituten vorhanden war, die sich auch in Marktanteilen niedergeschlagen hat. Es ist also durchaus vorstellbar, dass sich ähnliche Marktverhältnisse zwischen Produkten mit ähnlicher Funktionserfüllung wieder einstellen. In der Modellannahme soll der Sachverhalt potenzieller Substitution dergestalt berücksichtigt werden, dass in jeder Dekade ein bestimmter Prozentsatz des rechnerisch eigentlich benötigten Materialbedarfs nicht nachgefragt wird.

Eine zweite Möglichkeit, die benötigten Gipsmengen zu senken, besteht in bautechnischen Fortschritten, was durch die Möglichkeit eröffnet wird, in Zukunft „leichter“ zu bauen. Dies hat zur Folge, dass der spezifische Index für die Masse der Bauprodukte pro Bezugseinheit (m^2 oder m^3) sinkt und somit sukzessive die bestehenden schweren alten Gebäude durch leichte neue Gebäude oder Innenraumgestaltungen ersetzt werden. Dieser prognostizierte technische Fortschritt soll im folgenden insofern berücksichtigt werden, dass der spezifische Index für Gips pro m^2 Fläche in jeder Dekade um $0,01 \text{ t/m}^2$ zurückgeht.

Die Auswirkungen dieses Szenarios auf die Produktion und die Abfallmengen von Gipsprodukten im Zeitraum 2000-2050 werden in Form von Kohortentabellen in Anhang 3b dokumentiert.

	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Parameter:						
Zuwachs an Wohnfläche p.a. in m ² /Einwohner	0,30	0,30	0,24	0,18	0,10	0,10
Zuwachs an Nichtwohngebäude p.a., bezogen auf den Bestand 1995 (1.534 Mio. m ²)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
Bevölkerung in Mio	82.000.000	82.000.000	82.000.000	82.000.000	82.000.000	82.000.000
Relation (Gips/m ² Wohnfläche)	0,25	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15
Relation (Gips/m ² Nutzfläche)	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10
Substitution durch andere Baustoffe	0%	5%	10%	15%	20%	30%
Berechnung des Gipsbedarfs:						
Ersatzbau [t]	1.739.077	2.544.521	3.635.126	4.901.889	5.902.803	5.905.406
Ausstattungsbaue Wohngeb. [t]	6.150.000	4.440.300	3.188.160	2.132.820	1.049.600	861.000
Ausstattungsbaue Nichtwohngeb. [t]	613.600	510.055	448.695	391.170	337.480	268.450
Gipsbedarf [t]	8.502.677	7.494.876	7.271.981	7.425.879	7.289.883	7.034.856
Berechnung des Gipsangebots:						
Angebot Naturgips D [t]	3.000.000	2.588.487	2.114.982	1.728.094	1.411.979	1.153.690
Angebot REA-Gips [t]	5.745.612	5.093.253	4.267.516	3.297.963	3.342.564	3.444.205
Anhydrit / chemische Gipse [t]	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000
abzüglich Export [t]	-630.000	0	0	0	0	0
Gipsangebot [t]	9.215.612	8.781.739	7.482.498	6.126.057	5.854.542	5.697.895
Saldo	712.936	1.286.864	210.518	-1.299.822	-1.435.340	-1.336.962

Tabelle 6.7: Prognose des Gipsbedarfs 2000-2050 bei Substitution durch andere Stoffe⁴⁵¹, Angaben in t

Auch in dieser Modellrechnung wird das Defizit deutlich, das etwa ab dem Jahr 2020 wirksam wird und bereits in 2030 eine Größenordnung von etwa 1,3 Mio. t erreicht. Diese Menge wäre gerade noch aus Gips aus Abfallströmen in günstigen Kompartimenten zu decken, vorausgesetzt, der Recyclinggrad liegt in einem sehr effizienten Bereich um 60 %. Da der Gipsbedarf praktisch über den gesamten Zeitraum stagniert, das Angebot an Primärgips aber kontinuierlich zurückgeht, muss verstärkt der Einsatz von Recyclinggips erfolgen. Daher sind aus den Überlegungen folgende Schlussfolgerungen zu ziehen:

- Es ist unabdingbar, bereits heute Gipsprodukte so zu entwickeln, dass sie günstige Dispersionsgrade aufweisen und damit für ein effizientes und wirtschaftliches Recycling zur Verfügung stehen. Angesichts der mittleren Verweilzeiten für die meisten Gipsprodukte von 30-40 Jahren helfen diese sofort zu ergreifenden Maßnahmen, die Deckungslücke ab dem Jahr 2030 zu reduzieren. Ab 2030 müssen jährlich mindestens 1,5 Mio. t Recyclinggips aus Abfallströmen zur Nachfragedeckung eingesetzt werden.
- Aus der Kohortenanalyse der Gipsprodukte in Anhang 3b zeigt sich, dass der Strom an Gipskartonplatten und Vollgipsplatten im Abfall im Jahr 2030 zunächst 1 Mio. t/a bzw. 700.000 t/a beträgt. Er steigt bis zum Jahr 2050 auf 1,5 Mio. t/a bzw. 1 Mio. t/a, eine Größenordnung, mit der die Versorgungslücke gedeckt werden kann. Gleichzeitig ergibt sich durch die Substitution von Gips in Gipsprodukten mit ungünstigen Dispersionsgraden (Mörtel, Estrich) bereits ab dem Jahr 2020 eine rückläufige Bestandshöhe. Ein

Rückgang im Abfallstrom stellt sich bei Estrich etwa ab dem Jahr 2030 ein, bei Mörtel etwa ab 2040. Dennoch ist die Abfallmenge an Gips in Putzen und Mörtel mit 2 Mio. t/a immer noch beträchtlich, sie liegt dann immer noch mindestens doppelt so hoch wie die gesamte momentane Gipsabfallmenge.

- Es ist ein verstärktes Marketing für Gipsprodukte aus Recyclingmaterialien erforderlich, um bei den Nachfragern die Akzeptanz zu erhöhen. Dies impliziert die Anwendung des gesamten Marketing-Mix, also einschließlich Preisdifferenzierungen und Differenzierungen auf der Produktseite.
- Mit den bekannten Naturgipsvorräten sollte schonend umgegangen werden. Die oben angestellte Berechnung wurde mit einem Abbaupfad von 2 % der jährlich noch vorhandenen Naturgipsreserve in Deutschland gerechnet, was zu einer verbleibenden Reserve in Deutschland von ca. 60 Mio. t in 2050 führt.
- In den ersten Jahren bis etwa 2020 liegt ein Überschuss des Angebots über die Nachfrage vor. Es ist ratsam, diese Überschüsse in eine Monodeponie als Zwischenlager für künftige Bedarfe einzubringen, um spätere Unterdeckungen befriedigen zu können und die Option für die Entwicklung ressourcenschonender Technologien und Produkte zu ermöglichen.

6.1.3 Verbringung auf Monodeponien

Eine weitere Möglichkeit zur Steuerung des Inputs von Gips ist die temporäre Deponierung von anfallendem technischem Gips in Monodeponien. Die Verbringung auf eine Monodeponie als anthropogene Lagerstätte für Gips stellt eine Alternative zur Verarbeitung oder zum Export dar. Mögliche Knappheiten bei der Versorgung mit Gips etwa ab 2030 sollen hiermit hinausgezögert werden, damit mehr Zeit bleibt, die Versorgung durch andere Quellen, insbesondere die Nutzung des Recyclingpfades, zu ermöglichen.

Die Methodik der temporären Zwischenlagerung wird bereits seit geraumer Zeit angewandt, um einerseits kurzfristige Schwankungen des Angebots an synthetischem Gips auszugleichen (wechselnde Auslastung der Kraftwerke über die Jahreszeiten, Ausfall- und Stillstandszeiten), allerdings lagern die Gipsmengen in der Regel unter Dach. Über diesen Ausgleich jahreszeitlicher Schwankungen hinaus wurde im Jahr 1998 für die in Betrieb genommene Entschwefelungsanlage im Kraftwerk Jänschwalde eine frei liegende Monodeponie für REA-Gips eingerichtet, um den Betrieb der neben dem Kraftwerk befindlichen Gipsherstellung auch über die Laufzeit des Kraftwerks hinaus rentabel zu machen (erwartete Restlaufzeit des Kraftwerks 20-25 Jahre, garantierte Betriebszeit für die Gipsproduktion 40 Jahre).

Hypothese: Die Einlagerung von aktuell nicht benötigtem Gips in Monodeponien trägt zur Ressourcenschonung bei und vermindert die Stoffflüsse von Gips

Für die Jahre 2000-2020 ist ein Überschuss der angebotenen Gipsmengen über die nachgefragten Gipsmengen zu erwarten. Im Grunde handelt es sich damit um eine ähnliche Situation wie Ende der 80er Jahre mit dem Aufkommen des REA-Gipses, als intensiv versucht wurde, den entstehenden REA-Gips zu vermarkten, was letztendlich auch gelangt. Es kann erwartet werden, dass die Gipsindustrie versuchen wird, auch die gegenwärtig überschüssi-

⁴⁵¹ Naturgipsangebot: Annahme Abbau jährlich 2 % der vorhandenen Reserven (z.Zt. 160 Mio. t)

gen Mengen in Form von Gipsprodukten abzusetzen bzw., falls dies auf dem einheimischen Markt nicht möglich sein sollte, zu exportieren.

In einer Untersuchung zur Lagerfähigkeit von REA-Gips in freiliegenden Depots wurde ermittelt, inwieweit sich Nutzungsbeeinträchtigungen des Gipses und Umweltbeeinträchtigungen durch die Ablagerung von REA-Gips ergeben⁴⁵². Dabei zeigte sich, dass es ratsam ist, die Deponie weder an der Basis abzudichten noch eine Abdeckung vorzusehen, damit ein guter Wasserabfluss gewährleistet werden kann und die oberen Schichten des Depots nicht durch Fremdstoffe der Abdeckung unbrauchbar gemacht werden. Selbst nach mehrjähriger Lagerung des Rohstoffs ergaben sich so keine nachteiligen Qualitätsveränderungen des Gipses. Auch war das Depot stabil und wies eine hohe Standfestigkeit auf. Nach kurzer Zeit bildete sich auf der Oberseite eine dünne Kruste, die Staubverwehungen verhinderte. Auf lange ungestörten Depotflächen kam es zu spärlichem Bewuchs. Selbstverständlich gab es Einträge von Sulfat ins Grundwasser, die durch die von oben einsickernden Niederschläge hervorgerufen wurden. Im Versuch, der in einem noch aktiven Gipssteinbruch vor einem natürlicherweise sulfathaltigen Hintergrund durchgeführt wurde, konnte keine Erhöhung der Sulfatkonzentration durch den REA-Gips festgestellt werden. Nach Modellrechnungen soll auch in anderen Regionen mit einem weniger ausgeprägten sulfathaltigen Hintergrund die Konzentration von Sulfat um weniger als 10 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ zunehmen. Bislang liegen noch keine Untersuchungsergebnisse aus Jämschwalde vor, um diese Modellrechnung zu bestätigen. Empfohlen wird eine Aufhaldung auf möglichst kleiner Grundfläche mit entsprechend großer Höhe. Auch wird die Überprüfung der geologischen Tauglichkeit des Untergrunds angemahnt, wie die Entstehung eines unterirdischen Hohlraums unter einer Gipsdeponie in den USA durch ausgewaschenen Kalkstein mit anschließender Instabilität des Depots zeigt⁴⁵³.

Es bestehen also nur geringe geologische Bedenken, entstehenden REA-Gips in einer Monodeponie als Rohstoffreserve zwischen zu lagern. Dazu eignen sich in der Regel die in der Nähe der Braunkohlekraftwerke befindlichen Tagebaurestlöcher, um Transportkosten minimal zu halten. Für REA-Gips aus Steinkohlekraftwerken sollten geeignete Depots in der Nähe der Kraftwerke identifiziert werden. Die Größe derartiger Depots schwankt und hängt neben den lokalen Gegebenheiten auch vom voraussichtlichen Anfall an REA-Gips an. Leyshon berichtet über die Anlage eines Depots in Florida mit einer Grundfläche von 210 ha und einer maximalen Aufschüttung von 60 m zur Ablagerung von Phosphorgips. Die Kosten für die Einrichtung dieses Depots beziffert er auf rund 50 Millionen \$⁴⁵⁴.

Zur Abschätzung, in welchem Maß sich Monodeponien realisieren lassen können, müssen jedoch eine Reihe von Annahmen getroffen werden. Der aktuelle Vergleich zwischen Gipsangebot und Gipsnachfrage zeigt eine ausgeglichene Struktur, und es kann davon ausgegangen werden, dass entsprechende Produktionskapazitäten zur Verfügung stehen, die den anfallenden REA-Gips auch zu Produkten verarbeiten. Einer Deponierung von überschüssigen Gipsmengen wird vermutlich dann zugestimmt, wenn Gipsprodukte nicht mehr am Markt absetzbar wären. Von einem freiwilligen Verzicht auf vorhandene und absetzbare Gipsmengen zugunsten einer Deponierung kann aufgrund der Zielsetzung der Produktionsauslastung nicht ausgegangen werden. Eine Deponierung von überschüssigen Gipsmengen wird also nur dann erfolgen, wenn die Nachfrage nach den Produkten zurückgeht. Wie die Modell-

⁴⁵² Langer/Stein (1997, S. 13 ff.)

⁴⁵³ Leyshon (1996, S. 34). Es ist außerdem nicht auszuschließen, dass durch Verunreinigungen des Gipses und unter leicht erhöhtem Druck sich wieder unerwünschter Anhydrit bildet. (vgl. Kapitel 5.1.1.1)

⁴⁵⁴ Leyshon (1996, S. 35)

rechnungen zeigen, kann jedoch ohne gezielte Einflussnahme auf das Nachfragerverhalten von einem nennenswerten Rückgang der Nachfrage nicht ausgegangen werden. Um einen signifikanten Teil der entstehenden REA-Gipsmengen in Monodeponien einzubringen, sind daher Maßnahmen zur Beeinflussung sowohl der am Markt verfügbaren REA-Gipsmengen als auch des Nachfrageverhaltens der Produkthersteller und der Endverbraucher sowie gezielte Selbstverpflichtungen erforderlich.

Zu den denkbaren Maßnahmen gehört zum einen der Verzicht auf den Export von REA-Gips, sobald die Lieferverpflichtungen hierzu beendet sein werden. Zum zweiten könnte der Staat den Kraftwerken einen Teil der entstehenden REA-Gipsmengen abnehmen und somit dem Markt entziehen (der Preis für REA-Gips liegt z.Zt. bei etwa 5 – 15 DM/t und etwa um 5 DM/t unterhalb der Größenordnung, die auch für Naturgips zu entrichten ist⁴⁵⁵). Dies würde jedoch einen bedeutenden Eingriff in die gegenwärtige Marktpraxis darstellen, da zum einen der Marktpreis unmittelbar beeinflusst wäre, und zum anderen der Staat auf einmal Eigentümer des REA-Gipses wäre mit allen damit verbundenen Kosten zur Einrichtung und Unterhaltung der Deponien. Instrumentarien zur Steuerung des Nachfrageverhaltens der Produkthersteller und der Endverbraucher wie Inverkehrsbringungsverbote oder Abgaberegelungen für Gipsprodukte sind problematisch, da sie funktionierende Märkte beeinträchtigen würden.

Angesichts der sich verschärfenden Versorgungssituation ab 2030 scheint eine freiwillige Selbstbeschränkung der Gipsindustrie bei der Verarbeitung von REA-Gips sinnvoll zu sein. Diese Selbstbeschränkung könnte dergestalt aussehen, dass ab dem Jahr 2010 die insgesamt angebotene Menge an Naturgips, Naturanhydrit, REA-Gips und sonstigen technischen Gipsen die abgesetzte Menge von 1991 nicht übersteigt. Bis dahin werden verstärkte Bemühungen unternommen, recyclinggerechte Produktalternativen zu entwickeln. Ferner könnte auf diese Art die Entwicklung effizienter Recyclingtechnologien vorangetrieben werden, da Gips aus dem Abfallstrom nicht unter die freiwillige Selbstbeschränkung fällt.

⁴⁵⁵ Preis für REA -Gips gem. schriftlicher Aussage Dr. Kersten, Bundesverband Gips, vom 01.11.99. Zum Preis für Naturgips vgl. Thamm (1996, S. 785)

	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Gipsbedarf	8.500.000	5.300.000	5.300.000	5.300.000	5.300.000	5.300.000
Anhydritestrich	700.000	500.000	450.000	400.000	400.000	400.000
Gipsestrich	300.000	226.065	210.000	200.000	200.000	200.000
Putzmörtel	2.100.000	1.507.100	1.500.000	1.400.000	1.400.000	1.400.000
Gipskleber	40.000	23.275	23.275	25.000	25.000	25.000
Ansetzbinder	135.000	40.240	40.240	40.000	40.000	40.000
Vollgipsplatte	600.000	419.000	500.000	560.000	560.000	560.000
Vollgipsverbundplatte zur Wärmedämmung	200.000	46.500	0	0	0	0
Gipsfaserplatte	1.300.000					
Gipskartonplatte	1.400.000	800.000	800.000	900.000	900.000	900.000
Gipskartonverbundplatte z. Wärmdämm.	15.000	4.800	0	0	0	0
Modellformengips Keramikindustrie	100.000	92.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Modellformengips andere Industrie	100.000	92.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Medizinalgips	10.000	8.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Zement	1.500.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000
Angebot Naturgips D	3.000.000	2.588.487	2.114.982	1.728.094	1.411.979	1.153.690
Angebot REA-Gips	5.745.612	5.093.253	4.267.516	3.297.963	3.342.564	3.444.205
Anhydrit / chemische Gipse	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000
abzüglich Export	630.000	0	0	0	0	0
Summe Gipsangebot	9.215.612	8.781.739	7.482.498	6.126.057	5.854.542	5.697.895
Saldo	715.612	3.481.739	2.182.498	826.057	554.542	397.895

Tabelle 6.8: Verlauf von Angebot und Nachfrage nach Gipsprodukten bei einer freiwilligen Selbstbeschränkung auf 5,3 Mio. t ab 2010 (Angaben in t)

Während das Potenzial zur Einlagerung anfangs noch gering ist und vermutlich nicht zum Tragen kommt, erreicht es im Jahr 2010 mit Beginn der Selbstbeschränkung ein Maximum von fast 3,5 Mio. t pro Jahr. Gegen Ende des Betrachtungszeitraums fällt die deponierbare Menge kontinuierlich ab, da das Angebot an Naturgips und REA-Gips laufend geringer wird. Etwa ab 2050 wären Angebot und Nachfrage im Gleichgewicht, und die gebildete anthropogene Reserve, die sich im gesamten Zeitraum auf etwa 75 Mio. t angesammelt hat, käme zum Tragen. Bei der angenommenen Abbaurate von Naturgips in Höhe von 2 % der noch verfügbaren Reserven wären beide Lagerstätten etwa gleich groß (die Naturgipsreserve besitzt rechnerisch ca. 60 Mio. t). Somit wäre etwa ab 2050 eine Gleichgewichtssituation hergestellt, und ein Ressourcenengpass käme nicht zum Tragen.

In Anhang 3c werden die Auswirkungen der Selbstbeschränkung auf die Produktion und den Abfallanfall von Gipsprodukten im Zeitraum 2000-2050 dargestellt. Es fällt auf, dass für die meisten Produkte ein Rückgang des Abfallanfalls erst nach Ende der Lebensdauer der jetzt eingebrachten Produkte ab dem Jahr 2040 festgestellt werden kann. Für alle Gipsprodukte einschließlich der Vollgipsplatten und der Gipskartonplatten stellt sich spätestens ab 2040 eine Gleichgewichtssituation ein, in der der Input in den Bestand die gleiche Größenordnung erreicht wie der Output. Selbst bei sofortiger Beendigung der Produktion von Gipsfaserplatten fällt bis zum Ende des Betrachtungszeitraums eine jährliche Abfallmenge von über 200.000 t an. Der Bestand an Gipsfaserplatten beträgt im Jahr 2050 immer noch rund 3,5 Mio. t, obwohl die durchschnittliche Lebensdauer der letzten produzierten Gipsfaserplatten dann bereits abgelaufen ist.

Der Vorteil der anthropogenen Deponierung von aktuell nicht benötigten Gipsmengen liegt vor allem darin, dass der Naturgipsabbau, eine gewachsene Industrie in strukturschwachen Regionen, nicht unter dem Überangebot leiden müsste, sondern gleichberechtigt neben dem technischen Gips existieren könnte. Zudem eröffnet sich die Chance für die Naturgipsindustrie, auch über einen Zeitraum von 30 Jahren hinaus Gipsabbau für hochwertige Einsatzgebiete betreiben zu können.

Das Modell der freiwilligen Selbstbeschränkung birgt andererseits auch Risiken, so kann dadurch die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Gipsindustrie im europäischen Maßstab gefährdet werden, wenn sie den eigenen Markt nicht mehr im notwendigen Umfang bedienen kann. Des weiteren handelt es sich um einen klaren Eingriff in die Mechanismen des Marktes, da ab der Höhe der freiwilligen Selbstverpflichtung nicht mehr die Freiheit der Ressourcenwahl besteht, sondern darüber hinausgehende Absatzmengen aus Recyclinggips gedeckt werden müssen. Dies hat unmittelbare Konsequenzen für den Marktpreis.

6.2 Qualitative Veränderung durch recyclinggerechte Konstruktion von Gipsprodukten

Wie aus den Prognosen für die Entwicklung von Angebot und Nachfrage für Gipsprodukte ersichtlich wurde, muss spätestens ab dem Jahr 2030 auf Recyclinggips aus Bauabfällen zur Nachfragedeckung zurückgegriffen werden. Dabei wird zumindest in der Anfangszeit ein Teil der Rückgewinnung aus Bauprodukten erfolgen, die bereits jetzt im Stofflager Bau eingebracht sind, und somit eine Herausforderung an Technologien zum Umgang mit diesen Stoffen stellen. Diesen Fragen widmet sich Kapitel 6.3.

Ein weiterer Teil der Abfallströme stammt jedoch angesichts der verhältnismäßig geringen mittleren Lebensdauer von Gipsprodukten bereits im Jahr 2030 aus Bauprodukten, die noch gar nicht konstruiert, gebaut und ins Stofflager eingebracht wurden. Es ist also Aufgabe an die heutige Produktherstellung, Überlegungen zur späteren Kreislaufführung von Stoffen bereits in die Gestaltung der Produkte mit einfließen zu lassen. Dazu gehören neben Fragen der späteren Behandelbarkeit und Wiederverwertbarkeit auch Anforderungen an die Verlängerung der Lebensdauer der Produkte, um so den Gesamtstofffluss zu verlangsamen.

Hypothese: Durch recyclinggerechte Produktgestaltung für Gipsprodukte bereits heutzutage kann der Dispersionsgrad der im Stofflager befindlichen Produkte langfristig gesenkt und damit ein höherer Anteil wiederverwertbarer Materialien ermöglicht werden.

Die Forderungen, die an eine recyclinggerechte Produktgestaltung gestellt werden, korrespondieren insbesondere mit den technologischen Eigenschaften, die Produkte mit niedrigen Dispersionsgraden auszeichnen. Dazu werden nochmals die charakteristischen Merkmale niedriger Dispersionsgrade im Hinblick auf die technologischen Eigenschaften genannt⁴⁵⁶:

1. Verbindungsstruktur: Es ist darauf zu achten, einfache und lösbare mechanische Verbindungen vorzusehen, die auch nach Ablauf der Lebensdauer ihre Funktion behalten.
2. Monostruktur: Ein Produkt sollte grundsätzlich aus möglichst wenigen Werkstoffen bestehen.
3. Materialkennzeichnung: Jedes Produkt sollte von außen gekennzeichnet sein, wobei Inhaltsstoffe und besondere Eigenschaften vermerkt sind.
4. Sortierbarkeit: Das spätere Sortierverfahren soll mit geringstem Aufwand durchgeführt werden können. Produkte mit gleicher Funktion sollten in Aufbau und Geometrie standardisiert sein.
5. Standardisierung: Produkte mit gleicher Funktion sollten hinsichtlich ihrer Werkstoffzusammensetzung standardisiert sein. Schad- und Störstoffe sollten nach Möglichkeit vermieden werden und immobilisierbar eingebunden sein.
6. Zugänglichkeit: Das Produkt soll in der komplexen Struktur eines Gebäudes leicht zugänglich und demontierbar sein.
7. Beständigkeit: Das Produkt sollte gegen chemische und physikalische Einflüsse beständig sein. Insbesondere ist im Rahmen der Demontage darauf zu achten, dass es nicht zu chemischen Reaktionen kommen kann.
8. Entsorgungsweg: Das Produkt soll so gestaltet sein, dass später möglichst günstige Reduktionstechnologien genutzt werden können. Dabei gilt Wiederverwendung vor Wiederverwertung auf gleichem Anwendungsniveau vor Wiederverwertung in einem niedrigeren Anwendungsniveau.

Eine Prognose zukünftiger technologischer Entwicklung für Gipsprodukte ist naturgemäß schwierig und kann nur Hinweise auf diejenigen Produkte liefern, an denen konstruktiv gearbeitet werden sollte. Es ist jedoch vorstellbar, dass folgende Entwicklungen im Hinblick auf eine recyclinggerechte Produktgestaltung möglich sind:

- Verzicht auf die Herstellung von Gipskartonplatten und Vollgipsplatten zur Wärmedämmung. Es wird angenommen, dass die Produktion dieser Produkte bis zum Jahr 2020 linear auf 0 zurückgeht.
- Keine weitere Herstellung von Gipsfaserplatten. Für dieses Produkt (etwa 80 % Gips, 20 % Zellulosefasern) bestehen bislang keinerlei Entsorgungskonzepte. Auch ist nicht klar, wie ein Recycling hierbei erfolgen könnte. Statt dessen Herstellung von Vollgipsplatten, die ähnliche Funktionen erfüllen. Es wird davon ausgegangen, dass die Produktion der Gipsfaserplatten im Jahr 2010 eingestellt wird.
- Verzicht auf den Einsatz von Verbundestrich, um durch Zwischenlage von Trenn- oder Dämmschichten somit zumindest die Verbindungsstruktur zum tragenden Untergrund zu verbessern. Dennoch bleiben erhebliche Schwierigkeiten bei der Kreislaufführung von

⁴⁵⁶ vgl. Kapitel 4.1.2.1

Estrichmassen, da diese bei einer Baumaßnahme (Modernisierung, Abbruch) praktisch nicht sortenrein zu trennen sind. Es wird für die Modellbildung angenommen, dass sich der Dispersionsgrad der Estriche bis 2020 um eine Klasse verbessert, ferner wird die abgesetzte Menge rückläufig angenommen, da Anhydritestrich wieder von Zementestrich resubstituiert wird.

- Nicht abschätzbar sind die Entwicklungen bei den Putzgipsen. Ihr Dispersionsgrad ist außerordentlich schlecht und aufgrund der gewünschten Funktionserfüllung als Beschichtung von Innenwänden auch konstruktiv kaum verbesserbar. Als einzige Option bietet sich die Substitution durch Kalkputz an.
- Kennzeichnung der Produkte mit unterschiedlichen Rezepturen, wie dies bereits bei Gipsplatten geschieht. Auf die Entwicklung des Dispersionsgrads hat diese Maßnahme keinen unmittelbaren Einfluss.

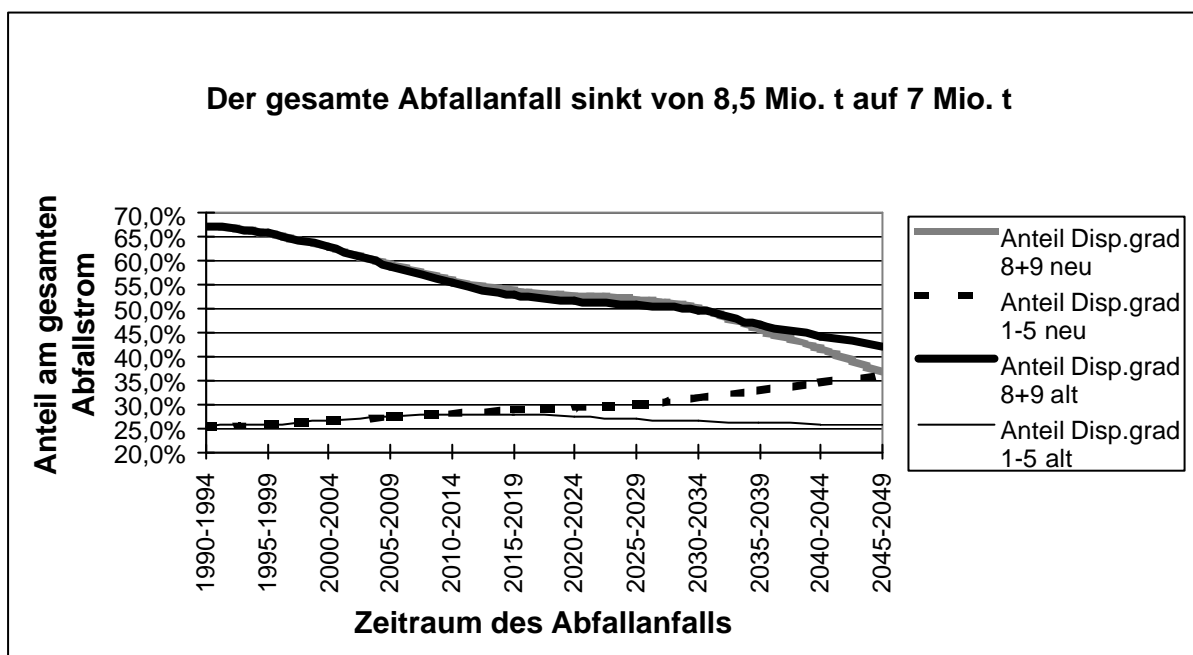


Abbildung 6.3: Veränderung der Zusammensetzung des Abfallstroms bei recycling gerechter Produktgestaltung

Die Durchführung der genannten Maßnahmen zur Umsetzung einer recyclinggerechten Produktgestaltung hat bereits ab dem Jahr 2030 Auswirkungen in der Zusammensetzung der Abfallströme. Es zeigt sich, dass der Anfall günstiger Dispersionsgrade (1-5) kontinuierlich zunimmt und im Jahr 2050 bereits etwa 1/3 des gesamten Abfallstroms ausmacht, während er ohne die recyclinggerechte Konstruktion auf einem Niveau von 25 % verharren würde. Auch der Anteil ungünstiger Dispersionsgrade geht aufgrund des Substitutionseffekts stärker zurück als beim Status quo. Bis zum Jahr 2030 ist der Verlauf jedoch im großen und ganzen identisch, da die Auswirkungen einer veränderten Produktgestaltung und -einbringung erst dann in nennenswertem Umfang wirksam werden. Gleichzeitig geht auch die absolute Höhe des Abfallstroms durch die Substitution von Gipsmengen bei Putzen und Estrichen zurück, so dass letztendlich rund 2,3 Mio. t an Abfallgips den günstigen Dispersionsgraden zugeordnet werden können. Die detaillierten Auswirkungen dieses Szenarios auf die Entwick-

lung der Produktions- und Abfallmengen der einzelnen Gipsprodukte können den kohorten-analytischen Darstellungen in Anhang 3b entnommen werden.

Die Hypothese, wonach eine recyclinggerechte Produktgestaltung bereits zum heutigen Zeitpunkt einen messbaren Effekt nach sich zieht, kann also aufgrund der Veränderung in der Zusammensetzung des Abfallstroms bestätigt werden.

Eine wesentliche Grundvoraussetzung zur Umsetzung einer ökologischen Produktgestaltung ist hingegen die Kooperation der Akteure im Stoffstrom Gips. In den Ausführungen zu den individuell-wahrnehmungsbezogenen Kriterien wurde bereits deutlich, dass es eine Reihe von Beteiligten und Betroffenen entlang des Lebenszyklus eines Produkts gibt, die einen wesentlichen Beitrag zu Annahme oder Ablehnung eines Konzepts zur recyclinggerechten Produktgestaltung leisten. So zeigt sich in der Praxis häufig, dass einzelne Produktionsunternehmen nur die Produktgestaltung entlang einer Stufe der Wertschöpfungskette beeinflussen können, weil sie in Abhängigkeiten zu Vorlieferanten und Abnehmern stehen. An Beispielen aus der Praxis kann gezeigt werden, dass ökologische Optimierungen von Produkten und Stoffströmen durch mangelnde Kooperation zwischen den beteiligten Akteuren nicht erfolgreich waren⁴⁵⁷. Bei erfolgreichen Akteurskooperationen kommen die Impulse zunächst meistens aus dem staatlichen Sektor oder von Forschungseinrichtungen, die zunächst die Problemlage aufzeigen und alle beteiligten Akteure zusammenbringen. Ziel dieser gemeinsamen Vorgehensweise ist die Konstruktion und anschließende Vermarktung von Produkten.

Vom Öko-Institut wurde dazu ein Katalog von Anforderungen an Akteurskooperationen formuliert, der aus folgenden Elementen besteht⁴⁵⁸:

- Zielformulierung (Entwicklungs- und Umweltziele)
- Durchführung von Stoffstromanalysen von Produkten sowie Verständigung auf Reduktionspotenziale entlang von Szenarien
- Bewertung von Produkten auf der Basis der formulierten Entwicklungs- und Umweltziele
- Umsetzung von Maßnahmen und Erfolgskontrolle
- Laufende Information und Kommunikation zwischen den Akteuren

Bezogen auf die Herstellung von Gipsprodukten bedeutet dies, die betroffenen Akteure zusammenzubringen. Hierzu zählen Vertreter der Rohstoffseite (Naturgipsförderer, Kraftwerksbetreiber), die Hersteller von Gipsprodukten, die Abnehmer und Anwender von Gipsprodukten (Bauindustrie sowie Gipser und andere kleine Handwerksbetriebe), die Bauschutt aufbereiter und die Deponiebetreiber als unmittelbar am Stoffstrom Beteiligte. Ferner sind der Bundesverband der Gipsindustrie sowie Architekten und Bauträger als mittelbar Betroffene zu beteiligen, schließlich Umweltverbände und staatliche Stellen. Im Rahmen des Stoffstroms Gips hat es bereits gemeinsame Veranstaltungen von Akteuren gegeben, die sich mit der Frage des Beitrags eines Stoffstrommanagement Gips zum Ressourcenschutz in Niedersachsen beschäftigten⁴⁵⁹. Somit ist bei wesentlichen Akteuren die Bereitschaft zur Kooperation bereits unter Beweis gestellt. Zudem weist die Gruppe der Hersteller von Gipsproduk-

⁴⁵⁷ vgl. Griebhammer et al. (1995)

⁴⁵⁸ vgl. Griebhammer/Buchert (1996, S. 30)

⁴⁵⁹ vgl. Dokumentation eines Akteursworkshop im Rahmen der Erstellung einer Vorstudie. Bislang ist das Projekt allerdings noch nicht über die Vorstudie hinaus weiter bearbeitet worden.

ten auf europäischer Ebene bis auf wenige Ausnahmen eine oligopole Struktur auf, die sich günstig auf den Koordinationsaufwand auswirken dürfte.

Zentrale Aufgabe dieser Akteurskooperation ist es, zunächst eine Zielsetzung zu entwerfen, die sich an den Grundsätzen der Nachhaltigkeit orientiert und sich einer ressourcenschonenden Wirtschaftsweise verschreibt, die für alle Stoffströme das ökologisch geeignetste Ziel vorsieht. Die bisher bestehenden Stoffströme von Produkten sollten im Hinblick auf ihre Eignung zur Erfüllung der Zielsetzung überprüft werden, wobei insbesondere Fragen der Restmassenbehandlung, des Recycling und der Deponierung eine wichtige Rolle spielen. Im Anschluss daran sollten Konzeptionen und Leitlinien für alternative Produktentwürfe formuliert werden und die Nichteignung von Produkten im Sinne der Nachhaltigkeit nochmals klar herausgearbeitet werden. Wichtige gemeinsame Aufgabe ist es anschließend, diese neuen Leitlinien auch zu vermarkten und den Nachfrager von der Vorteilhaftigkeit einer recyclinggerechten Konstruktion zu überzeugen.

6.3 Einflussfaktoren auf der Outputseite

Zur Etablierung der Kreislaufwirtschaft von Gips ist ein wirksamer Umgang mit den anfallenden Abfallströmen neben den erst langfristig wirksamen Maßnahmen auf der Inputseite erforderlich. Dabei fallen alle Gipsabfälle, ob sie aus dem Bauwesen oder ihren Verwendungsgebieten als Modellformen- oder Dentalgipse stammen, unter die Begriffsbestimmung des § 3 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) und somit auch unter die vermeidungsorientierte Pflichtenhierarchie gemäß § 5 KrW-/AbfG⁴⁶⁰. Danach müssen Abfälle vorrangig vermieden, nicht vermeidbare Abfälle verwertet (sofern dies technisch möglich, wirtschaftlich zumutbar und gleichzeitig umweltverträglicher als die Beseitigung ist), und nicht verwertbare Abfälle entsorgt werden. Ferner sieht das KrW-/AbfG vor, dass Getrennthaltungspflichten eingeführt werden können, wenn dies der Erreichung der gesetzlichen Ziele dienlich ist (§ 7 KrW-/AbfG). Eine weitere Herausforderung entsteht durch die Neudefinition des Begriffs Abfallerzeuger. Nach § 3 Abs. 5 KrW-/AbfG ist der Abfallerzeuger jene Person, durch deren Tätigkeit Abfälle angefallen sind sowie jene Person, die Abfälle vorbehandelt, mischt oder behandelt. Konkret ergibt sich damit, dass der Bau- bzw. Abbruchunternehmer und nicht der Bauherr als Abfallerzeuger anzusehen ist, da er zum Zeitpunkt des Abfallanfalls Besitzer des Abfalls war. Es ist also Aufgabe der Bau- bzw. Abbruchunternehmer, die kreislaufgerechte Entsorgung der Abfälle sicherzustellen, wobei er dies eigenverantwortlich unter Einschaltung Dritter organisieren kann (§§ 16, 17 KrW-/AbfG). Neben der kreislaufwirtschaftlichen Zielsetzung leitet sich also aus dieser gesetzlichen Anforderung heraus die Zielsetzung ab, technische und wirtschaftliche Möglichkeiten zu identifizieren, um entstehende Gipsabfälle nach Möglichkeit zu verwerten.

Das bevorstehende Deponierungsverbot von vermischtem Bauschutt ab Juni 2001 hat unmittelbar auch Einfluss auf die weitere Behandlung von Abfallströmen an Gips aus dem Baubereich. Bislang erweist sich der gesamte Stoffstrom Gips, von wenigen Ausnahmen durch produktionsintegrierte Kreislaufführung abgesehen, als Durchflussreaktor, bei dem die Gipse in den Abfallströmen auf Deponien verbracht wurden. Die Ablagerung auf den Bauschuttdeponien erfolgte vermischt mit anderen mineralischen Baumaterialien, so dass der Anteil des Gipses an der gesamten Bauschuttfraktion gering und in der Regel eine Deponierung zu

⁴⁶⁰ Zur Bedeutung des KrW/AbfG und der untergesetzlichen Regelwerke für die Bauwirtschaft vgl. Kapitel 3.6

geringen Kosten möglich war⁴⁶¹. Prinzipiell geltende Anforderungen etwa an den Sulfatgehalt im Eluat von abzulagernden Materialien existieren nicht, auch die TA Siedlungsabfall sieht hier keine Grenzwerte vor⁴⁶².

Bedingt durch die neue rechtliche Situation, aber auch durch die nachgewiesene ökonomische Vorteilhaftigkeit von Recyclingbaumaterialien, wird nun verstärkt begonnen, das mineralische Abbruchmaterial in Bauschuttaufbereitungsanlagen, unterstützt durch selektiven Rückbau, so zu trennen, dass ein möglichst großer recyclingfähiger Anteil aussortiert werden kann. Dabei wird die besonders gipshaltige Feinfraktion abgesondert, da sie die Verwertung als Zuschlagstoff für Beton oder im Tiefbau nach den geltenden Regeln verhindert⁴⁶³, ferner werden zunehmend bereits beim selektiven Rückbau Gipsplatten getrennt erfasst und gesammelt. Da die relative Konzentration von Gips im Bauschutt jetzt durch die zurückgehende Vermischung mit anderen mineralischen Materialien steigt, verlangen die meisten Deponien auch wesentlich höhere Gebühren für nicht recyclingfähiges Material, die häufig um den Faktor 3-10 über den bislang bezahlten Gebühren für recyclingfähige mineralische Abfälle liegen.

Angesichts dieser Entwicklung rücken auch verstärkt Verfahren ins ökonomische Blickfeld, die eine Verwertung der anfallenden Gipsabfälle ermöglichen. Da gegenwärtig nur ein sehr geringer Teil der Gipsabfälle verwertet wird und darüber hinaus sich auch eine große Menge in ungünstigen Dispersionsgraden befindet, soll im folgenden auf einzelne, insbesondere neuere Verfahren des Recycling von Gipsabfällen eingegangen werden und überschlägig kalkuliert werden, bei welchen Deponierungsbedingungen die ökonomische Akzeptanz erreicht wird. Da sich viele Verfahren erst im Labor- bzw. Experimentierstadium befinden, können Kostenabschätzungen nur überschlägig angestellt werden.

6.3.1 Verwertung von Produktionsabfällen

Der bei der Herstellung von Gipsprodukten anfallende Output wird im großen und ganzen wiederverwertet, da ein Teil der Werke für die Herstellung von Gipsplatten und Gipskartonplatten über Recyclinganlagen verfügt, um bei der Produktion und beim Einbau anfallende Reste wieder einzusetzen. Die Gesamtmenge an Abfall bei der Produktion und dem Neubau wird auf 5 % der Plattenproduktion geschätzt, dies entsprach 1996 etwa 100.000 t/a. Die zurückführbare Jahresmenge an Gipsplattenverschnitt wird auf 60.000 t/a geschätzt, allerdings bestehen keine Rücknahmesysteme, auch nicht für Großkunden⁴⁶⁴. Es kommt daher in der Regel auch nur zur Wiederverwendung von Produktionsabfällen, jedoch nicht von Verschnittabfällen. Neben den Plattenresten werden ferner Silo-Restinhalte an Baugipsen zur Putz- und Estrichbereitung wieder zurückgenommen und dem Kunden als ungebrauchtes Produkt vergütet⁴⁶⁵. Die erzielten Verwertungsquoten für die einzelnen Produktgruppen sind sicherlich noch steigerungsfähig, allerdings machen die anfallenden Mengen nur etwa 10 % des gesamten Gipsanfalls aus. So ist zum Beispiel in den Benelux-Ländern die Getrenntsammlung von Neubauverschnitt auch beim Einbau von Gipsplatten Pflicht, diese Mengen

⁴⁶¹ Einige Deponien klassifizieren angelieferten vermischten Bauschutt nach dem Gipsgehalt, wobei auch hier die Kriterien stark differieren. Gipshaltiger Bauschutt kostet etwa den Faktor 3-10 mal mehr als nicht gipshaltiger Bauschutt.

⁴⁶² vgl. Anhang 1

⁴⁶³ Hierbei gelten etwa die von der Länderarbeitsgemeinschaft LAGA aufgestellten Festlegungen für Zuordnungswerte zum Schutz des Grundwassers, die „Technischen Lieferbedingungen für Recycling-Baustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel“ für den Einsatz im Tiefbau sowie die DIN 4226, die den Sulfatgehalt für Betonzuschläge auf 1 Gew.-%, bezogen auf SO₃, begrenzt.

⁴⁶⁴ gemäß schriftlicher Auskunft Hr. Moldan, Fa. Knauf vom 28.08.96

werden anschließend von den Gipsproduktherstellern zurückgenommen und wieder in die Produktion eingefügt.

Ferner werden die mengenmäßig wenig bedeutsamen Spezialgipsprodukte wie Formgipse der keramischen Industrie heute schon zum Großteil zurückgenommen und in der Regel wiederverwertet.

6.3.2 Recycling von Gipsplatten

Die Wiederverwertung und Weiterverwertung von Gipsplatten aus Bauschutt erfolgt bislang nur in geringen Mengen und in Pilotversuchen.

Gipsplatten müssten, um verwertet werden zu können, getrennt erfasst werden. Nach Aussage des Gipsverbandes ist die ökonomische Rentabilität der getrennten Erfassung bislang jedoch noch nicht gegeben, da noch zu wenige Gipsplatten im Baurestmassenstrom enthalten seien. Ein weiterer Nachteil sei die geringe Verbraucherakzeptanz, da Gipsprodukte, die aus wiederverwerteten Gipsplatten oder Gipskartonplatten hergestellt werden, Farbverunreinigungen aufweisen können⁴⁶⁶. Hinzu kommt die Konkurrenz zu zur Zeit noch sehr günstigem Frischgips.

Wie aus den Ausführungen zum Dispersionsgrad hervorgeht⁴⁶⁷, ist jedoch eine getrennte Erfassung von Gipsplatten bei Abbruch oder Modernisierung eines Gebäudes technisch sehr leicht möglich. Diese Bauteile zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass sie in der Regel nur mit mechanischen Verbindungen befestigt sind und daher leicht demontiert werden können. Erforderlich ist jedoch der Aufbau einer logistischen Sammelinfrastruktur auf der Baustelle. Hierzu sind zunächst Container erforderlich, deren Kosten auf etwa 100 DM / Großcontainer mit 30 m³ Inhalt geschätzt werden, ferner muss Personal und Arbeitsgerät zur selektiven Demontage der Gipsplatten aufgewendet und die logistische Planungsleistung berücksichtigt werden. Schultmann gibt als Zeitbedarf für das Abgreifen von Innenwänden einen Wert um 1,5 Stunden / m³ Wand an, entsprechend bei einem Personalkostensatz von 80 DM / Stunde ein Wert von 120 DM / m³, ferner fallen etwa 10 DM / h für einen Minibagger an, d.h. 15 DM / m³⁴⁶⁸. Aus dem durchschnittlichen spezifischen Gewicht der Platten von 1,2 t / m³ sowie einer Schüttdichte von 0,3 t / m³ im Container. Es ergibt sich etwa ein Wert von ca. 150 DM / t für die gezielte Erfassung der Gipsplatten in Containern.

Demgegenüber fallen bei einer nicht selektiven Vorgehensweise höhere Kosten für die Maschinen zum Abbruch, ebenfalls Containerkosten (wenn auch in geringerem Umfang, da das Materialvolumen durch den Abbruch reduziert wurde) und Kosten der Bauschuttsortierung an. Zieht man die Personalaufwendungen für die selektive Erfassung der Gipsplatten sowie einen Anteil für die höhere Schüttdichte in den Containern ab und setzt statt dessen rund 20 DM / t für die Anlieferung an einer Bauschuttsortieranlage an, erhält man in diesem Fall etwa 50 DM / t.

Neben der Möglichkeit, die Gipsplatten direkt selektiv aus dem Gebäude auszubauen, besteht auch die Möglichkeit der Aussortierung in den Bauschuttaufbereitungsanlagen. Auch in diesem Trennverfahren fallen Personalkosten an, da die stückigen Gipsplattenreste manuell

⁴⁶⁵ gemäß schriftlicher Auskunft Dr. Kersten, Bundesverband Gips vom 03.11.98

⁴⁶⁶ gemäß schriftlicher Auskunft Dr. Kersten, Bundesverband Gips vom 03.11.98

⁴⁶⁷ vgl. Kapitel 4.1.2.

⁴⁶⁸ vgl. Schultmann (1998, S. 85 ff.)

aussortiert werden müssen, ferner ist der Erfassungsgrad geringer als beim selektiven Rückbau. Bezüglich der Kosten kann davon ausgegangen werden, dass die Sortierung in der Bauschuttzubereitungsanlage etwas günstiger ist als die direkte Getrennthaltung.

Daraus entsteht in etwa folgende Kostenkalkulation für die Behandlung von Gipsplatten im Abfallstrom:

Maßnahme		Getrennte Erfassung (DM / t)	Gemeinsame Erfassung (DM / t)
Abbruch	Personalkosten	120	
	Materialkosten (Bagger)	15	25
	Containerkosten	10	5
Transport	Ca. 20-30 km im Durchschnitt		5-8
Verarbeitung	Bauschuttrecyclinganlage		20
Verbleib	Verwertung		
	Deponierung als nicht recyclingfähiger Bauschutt		75-200 ⁴⁶⁹
Summe		Mind. 150	130-260

Tabelle 6.9: Vergleich von Aufbereitungskosten für Gipsplatten

Nach Tabelle 6.9 stellen die Deponierungskosten den wesentlichen ökonomischen Parameter bei der Beurteilung der verschiedenen Verwertungsverfahren für Gipsplatten dar. Wenn die Deponiegebühren nur 75 DM / t für den nicht recyclingfähigen Bauschutt betragen, kann die getrennte Erfassung der Gipsplatten aufgrund der hohen Personalkosten nicht wirtschaftlich durchgeführt werden, sofern sich nicht eine positive Differenz aus den Verwertungserlösen abzüglich den Transport- und Verarbeitungskosten ergibt. Ab einem Deponiepreis von etwa 100 DM / t beginnt die Möglichkeit der ökonomischen Substitution, bei Deponiegebühren von 200 DM / t können rund 100 DM / t für den Transport und die Verarbeitung von Gipsplatten aufgewendet werden. 700 DM / t sind an einigen Deponiestandorten fällig, wenn der angelieferte Bauschutt als Gipsabfall mit einem Gipsanteil > 10 % eingestuft wird.

Wie bereits erwähnt, gibt es bislang kaum Bestrebungen, die getrennte Sammlung von Gipsplatten aus Bauabfällen durchzuführen, da die ökonomische Rentabilität derzeit nicht gegeben ist.

Hummel beschreibt ein Verfahren zur Wiederaufbereitung von Gipsplatten⁴⁷⁰. Dabei werden die Platten von Schnecken zerkleinert und durch Messerzerkleinerer gedrückt. Nach der Zerkleinerung gelangen die Platten auf eine Siebmaschine, in der Material < 25 mm ausgesiebt wird. Durch einen Austragsboden wird das Material mit einer Dichte von 0,6 t/m³ auf ein Band ausgetragen, wodurch eine weitestgehende Trennung von Karton und Gips erzielt wird. Der Gips wird anschließend mit Rohstein zusammen gemahlen und im Kocher weiterverarbeitet. Das Papier wird zu Quadern verpresst und kann erneut zur Herstellung von

⁴⁶⁹ Einige Deponien stufen mit Gips verunreinigten Bauschutt als Gipsabfälle ein und verlangen bis zu 700 DM/t.

⁴⁷⁰ vgl. Hummel (1997, S. 7)

Gipskartonplatten eingesetzt werden. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit der Wiederverwertung der Gipsplatte im gleichen Kreislauf auf gleicher Qualitätsstufe. Leider wurden vom Betreiber Knauf keine Kosteninformationen genannt. Das Verfahren wird zur Zeit nur zum Recycling von Produktionsabfällen eingesetzt, da die im Bauschutt befindlichen Gipskartonplatten weder von ihrer Menge noch von ihrer Sortenreinheit so beschaffen sind, dass sie einen rentablen Einsatz des Verfahrens ermöglichen würden. Dies gilt auch für den Neubauverschnitt, dessen Anfall ohnehin klein ist gegenüber dem Anfall im Bauschutt⁴⁷¹.

Pilotversuche überprüfen die Eignung von Gipsplatten bei der Rekultivierung von Kalihalden in Thüringen. Die stark alkalischen Abraumhalden von der Kaliproduktion erhalten durch die Abdeckung mit den eher „sauen“ Gipsplatten an der Oberfläche ein ausgeglichenes Milieu, so dass sich an dieser Stelle Vegetation entwickeln kann. Untersuchungen zeigen, dass keine nennenswerten Umweltbeeinträchtigungen vorliegen, so dass die Abdeckung von Kalihalden mittlerweile als Verwertung gemäß KrW-/AbfG deklariert worden ist. Allerdings sind die hierdurch verwertbaren Mengen, die sich auf etwa 100 km² schätzen lassen, im Vergleich zu den im Stofflager befindlichen Mengen sehr gering, weswegen eine wesentliche dauerhafte Entlastung der Deponien hiervon nicht erwartet werden kann (die verbringbare Menge entspricht der halben Produktion des Jahres 1997 an Gipskartonplatten). Aus den ökonomischen Überlegungen heraus scheint diese Verwertung jedoch kurzfristig eine interessante Alternative darzustellen, da für die Anlieferung der Gipsplatten nur etwa 15-20 DM / t an die Betreiber der Kalihalden gezahlt werden muss.

Eine weitere Möglichkeit des Einsatzes von Abfallgips aus Gipsplatten ist die Herstellung von Düngemitteln, wozu die Gipsplatten gemahlen werden. Ziel ist es, Kulturböden mit Schwefel zu düngen, da nach dem Einbau von Rauchgasentschwefelungsanlagen aus dem einstigen Überschuss an Schwefel („saurer Regen“) mittlerweile an einigen Stellen ein Schwefelmangel eingetreten ist. Auch für stark versauerte Standorte kann Gips ein interessanter Calciumdünger sein, weil unter diesen Voraussetzungen das Sulfat als Begleit-anion für das Calcium benötigt wird, um im Wasser gelöst in tiefere Bodenschichten eindringen zu können⁴⁷². So wird von einer deutlichen Bodenverbesserung beim Zitrusfruchtanbau auf sandigen Böden in Florida berichtet⁴⁷³. Auch wird der Einsatz von Schwefeldünger in den Tropen geprüft, weil dort die Schwefelvorräte im Boden durch hohe Niederschläge ausgewaschen werden. Es gibt jedoch auch eine Reihe von Stimmen, die vor einer verbreiteten Schwefeldüngung mit Gips aufgrund der treibenden Eigenschaften des Sulfats und der dadurch hervorgerufenen Möglichkeit der Auswaschung ins Grundwasser warnen⁴⁷⁴. Aufgrund der noch ungeklärten ökologischen Bewertung der Schwefeldüngung mit Gips ist in absehbarer Zeit nicht damit zu rechnen, dass dieser Verwertungspfad große Mengen an Abfallgips absorbieren wird.

Darüber hinaus besteht für Gipsplatten auch die Möglichkeit, diese sowohl über die Herstellung von Anhydrit zur Verwendung als Abbinderegler für die Zementindustrie als auch über das Müller-Kühne-Verfahren⁴⁷⁵ thermisch zu verwerten. Für beide Verwertungsverfahren laufen zur Zeit Versuchschargen, die bislang positive Ergebnisse erbracht haben. Die Entsorgungskosten liegen bei der thermischen Verarbeitung zu Anhydrit bei 20-30 DM / m³, bei der Verwertung im Müller-Kühne-Verfahren bei rund 50-60 DM / t. Ferner besteht noch die

⁴⁷¹ telefonische Auskunft von Herrn Moldan, Fa. Knauf, am 30.11.99

⁴⁷² vgl. Sommer et al. (1992, S. 381)

⁴⁷³ vgl. Alva (1994, S. 627)

⁴⁷⁴ vgl. Pentinghaus (1999)

⁴⁷⁵ Eine Beschreibung des Müller-Kühne-Verfahrens zur Verwertung von gipshaltigen Baustoffen erfolgt in Kapitel 6.3.4.1

Alternative, Gipsabfälle zu Rekultivierungsprojekten im Bergbau einzusetzen, wenn der entsprechende geogene Sulfathintergrund vorhanden ist. Auch eine gemischte Deponierung von Aschen und Gips im Bergbau wird erwogen, wobei es im Hinblick auf die Beeinträchtigung der Grundwasserqualität wesentlich auf die Güte der Oberflächenabdichtung ankommt⁴⁷⁶.

Alle genannten Verfahren sind jedoch im Sinne einer Kreislaufführung ungeeignet, da sie für sortenreine Produkte mit günstigen Dispersionsgraden, die sich gut für eine Wiederverwertung eignen, ein Downcycling vorsehen. Für Gipsplatten eignet sich die Kreislaufführung über die Wiederaufbereitung, die ein weitestgehendes Recycling auf der gleichen Stufe ermöglicht und technisch bereits verfügbar ist. Dieses Verfahren dürfte genau dann rentabel werden, wenn

- die Technische Anleitung Siedlungsabfall umgesetzt wird und eine gemeinsame Ablagerung von vermischtem Bauschutt nicht mehr möglich ist
- die Kosten der Deponierung von gipshaltigem Bauschutt auf mindestens 100 – 150 DM/t steigen, sofern das Material als nicht recyclingfähiger Bauschutt eingestuft wird, ggf. für Gipsplatten sogar eine Klassifizierung als Gipsabfall vorgenommen wird und die Deponiepreise noch stärker steigen
- technische Realisierungen entwickelt werden, um eine Dezentralisierung des Verfahrens zu ermöglichen und Transportkosten zu sparen
- der Angebotsdruck von Naturgips und REA-Gips nachlässt, da Teile hiervon einer Monodeponierung zugeführt werden
- der Strom an Gipsplatten aus dem Stofflager Bauwesen in Zukunft zunimmt.

Der wesentliche Teil der Gipsplatten bietet aufgrund ihres geringen Dispersionsgrads ein großes Potenzial zur Wiederverwertung, das bei Vorliegen der oben genannten Bedingungen in jedem Fall genutzt werden sollte.

6.3.3 Recycling von Baugipsen

Baugipse in Putzen und Mörteln sowie Estriche auf Anhydrit- und Estrichbasis werden bislang noch gar nicht rezykliert. Dies zeigte sich auch aus den Ausführungen zur Bestimmung des Dispersionsgrads, der aufgrund der Eigenschaften von Baugipsen (keine mechanische Verbindung, nicht direkt lösbar, stark verunreinigt etc.) mit einer entsprechend ungünstigen Bewertung versehen wurde. Aus dem Abbruch fallen die Baugipse nicht als sortenreiner Gipsabfall an, und auch in einer Bauschuttaufbereitungsanlage werden sie mit dem Zweck der Gipsabreicherung anderer Materialien in der Feinfraktion aussortiert. Für die verbleibenden mineralischen Stoffe sollen die Grenzwerte bezüglich der bautechnischen Eignung⁴⁷⁷ und der umwelttechnischen Anforderungen bezüglich der technischen Regeln der LAGA eingehalten werden⁴⁷⁸.

Zur Trennung der Baugipse von ihrem meist mineralischen Trägermaterial kommt dabei sowohl die direkte Trennung auf der Baustelle als auch die Trennung in der Bauschuttaufberei-

⁴⁷⁶ vgl. Starke (1991, S. 919)

⁴⁷⁷ Die bautechnische Eignung wird in den Technischen Lieferbedingungen für Recycling-Baustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel für den Tiefbau (TL RC-ToB) sowie in der DIN 4226 für den Hochbau festgelegt.

⁴⁷⁸ vgl. Anhang 1

tungsanlage in Frage. Bei einer Trennung in der Bauschuttaufbereitungsanlage neigt das Sulfat dazu, sich verstärkt in der Feinfraktion 0-8 mm anzureichern. Allerdings zeigen Untersuchungen, dass die Anreicherung in der Feinfraktion in der Regel nicht ausreicht, um den Gehalt an Sulfat in den größeren Fraktionen nennenswert zu reduzieren. So kommen Schachermayer et al. bei ihren Versuchen mit vorsortiertem Bauschutt und Betonabbruch zu einer nahezu gleichmäßigen Verteilung des Sulfats im Eluat auf die drei Fraktionen 0-4 mm, 4-16 mm und 16-32 mm⁴⁷⁹. Auch Rentz et al. bestätigen diese Ergebnisse. Bei ihren Untersuchungen können sie zeigen, dass der Sulfatgehalt im Eluat sowohl in der Ausgangsfraktion als auch in den zwei gebildeten Fraktionen 0-4 mm und 4-25 mm identisch war. Sie führen dies darauf zurück, dass vor der Aufgabe in die Bauschutt-sortieranlage Gipsplatten und Stücke von Gipsplatten entfernt wurden und nur noch die von Putz, Mörtel und Estrich stammenden Baugipse übrig blieben⁴⁸⁰.

Das Ergebnis der Untersuchung von Rentz ist von ihren absoluten Werten der Sulfatkonzentration jedoch wenig ermutigend: trotz einer vorher durchgeführten Entfernung von stückigem Gips gelang es nicht, durch Absiebung den Sulfatgrenzwert selbst der Einbauklasse Z2 der LAGA zu erreichen, bei dem ein eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherheitsmaßnahmen zumindest noch möglich wäre, da die gefundenen Werte um etwa 50 % über dem Grenzwert für einen zumindest eingeschränkten Einbau lagen. Beim Versuch von Schachermayer et al. lag der Messwert für SO_3 , der als Grenzwert für die Verwendung als Betonzuschlag in Frage kommt, bei etwa 5 g/kg Trockensubstanz und damit unter dem Höchstwert von 1 Gew.-%. Eine Aufbereitung von gipshaltigem Material in der Bauschutt-sortieranlage kann zu nicht vorhersehbaren und häufig sehr unbefriedigenden Ergebnissen hinsichtlich der Verwendbarkeit anderer Materialien führen, da diese nun die umwelttechnischen Anforderungen für eine Verwendung als Recyclingmaterial nicht mehr erfüllen und statt dessen zu einem wesentlich höheren Kostensatz von 75-200 DM / t unter der Klassifikation „nicht recyclingfähiges Material“ deponiert werden müssen. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Zuordnungswert der LAGA zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit herangezogen wird, da er sehr strenge Grenzwerte für die Sulfatkonzentration im Eluat festlegt, die allerdings von verschiedenen Seiten her bestritten⁴⁸¹ oder zumindest angezweifelt werden⁴⁸².

Sollte sich daher im Rahmen von Abbruchmaßnahmen herausstellen, dass ein höherer Gehalt an Baugipsen im Abbruchmaterial zu erwarten ist⁴⁸³, empfiehlt sich immer die direkte Trennung von Baugipsen auf der Baustelle in Form eines selektiven Rückbaus. Diese Maßnahme ist jedoch sehr kostenaufwändig und technisch nicht einfach durchzuführen, da der Gipsputz direkt mit dem Untergrund verbunden ist und bei der Abtrennung auch erhebliche Zerstörungen am Untergrund hervorgerufen werden. Mögliche Vorgehensweisen sind⁴⁸⁴:

- manuelle Abtragung mit Hilfe von Meißeln oder Gipserbeilen, die sich jedoch nur für kleine Flächen anbietet. Bei Versuchen konnte eine Leistung von etwa 15 m²/h erzielt werden, je nach Werkzeugeinsatz und Untergrund ergeben sich Kosten von 4-60 DM/m².
- Bodenfräsen zur Entfernung von Estrich (Kosten von 3-15 DM/m²).

⁴⁷⁹ vgl. Schachermayer et al. (1997, S. 36)

⁴⁸⁰ vgl. Rentz et al. (1997, S. 175)

⁴⁸¹ vgl. schriftliche Aussage Dr. Kersten, Bundesverband Gips vom 03.11.98

⁴⁸² vgl. Rentz et al. (1997, S. 188)

⁴⁸³ Ein Indiz für einen höheren Gehalt kann aus der Beschränkung für die Verwendung von Sekundärmaterial im Recyclingbeton nach DIN4224 abgeleitet werden. Hiernach darf der auf SO_3 bezogene Gehalt nicht mehr als 1 Gew.-% ausmachen, das entspricht einem gesamten Gipsgehalt im Bauschutt von etwa 1,7 % unter der Annahme, dass der Gips trocken ist.

⁴⁸⁴ vgl. Schultmann (1998, S. 42) sowie Rentz et al. (1997, S. 108 ff.)

- Sandstrahlen zum Abtrag mineralisch gebundener Putze mit allerdings erheblicher Belastung des Untergrunds. Die Kosten belaufen sich auf 20-30 DM/m². Nachteilig ist auch, dass zusätzlicher Aufwand zum Trennen von Sand und Gips erforderlich ist.
- Hochdruckwasserstrahlen zur Entfernung von Putzen. Die Kosten werden in Abhängigkeit vom Vorhandensein einer Absaugvorrichtung zur Erfassung der großen Wasser- und Schlamm-mengen auf 15-45 DM/m² geschätzt.
- Abtragung von Gipsputz mit Hilfe von Mikrowellen. Dieses Verfahren befindet sich noch im Versuchsstadium, weswegen keine Kostenschätzungen bislang vorliegen. Eine kurze Beschreibung hierzu wird in Kapitel 6.3.4.2.

In der Praxis hat sich zur Entfernung von Putzen das Hochdruckwasserstrahlen als die am besten geeignete Variante herausgestellt. Unter der Annahme, dass der Putz im Durchschnitt eine Dicke von 25 mm aufweist, ergeben sich hieraus Kosten von etwa 600-1800 DM/m³, entsprechend 500-2000 DM/t⁴⁸⁵. Falls keine Absaugvorrichtung benutzt wird, kommt insbesondere bei Einsätzen im Wohnbau die Beseitigung der Wasser- und Schlamm-mengen hinzu, weswegen Kosten zwischen 1000-2000 DM/t kalkuliert werden sollten. Hinzu kommen Containerkosten (Annahme: Kosten eines Großcontainers mit 30 m³ = 100 DM entsprechend 3 DM/t) sowie Kosten der weiteren Verarbeitung. Da der Baugips bislang lediglich deponiert wurde, fallen hierbei weiterhin Kosten der Deponierung als nicht recyclingfähiger Bauschutt in Höhe von 75-200 DM/t sowie die Transportkosten zur Deponie an⁴⁸⁶.

Maßnahme		Getrennte Erfassung (DM / t)	Gemeinsame Erfassung (DM / t)
Abbruch	Personal- und Materialkosten	1.000-2.000	25
	Containerkosten	3	5
Transport	Ca. 20-30 km im Durchschnitt	5-8	5-8
Verarbeitung		50	20
Verbleib	Deponierung als nicht recyclingfähiger Bauschutt		75-200
	Deponierung als gipshaltiger Abfall	700	
Summe		1.760-2.760	130-260

Tabelle 6.10: Vergleich von Aufbereitungskosten für Baugipse

Aus dieser Abschätzung zeigt sich, dass sich die gezielte Entfernung des Gipsputzes dann lohnt, wenn die Kosten für die getrennte Erfassung und Deponierung des Putzes zuzüglich der Kosten für die Bearbeitung des weiterverwertbaren mineralischen Materials (im obigen Fall etwa 50 DM/t) gleich den Kosten für die Bearbeitung und Deponierung der gesamten potenziell durch Gipsputz „gefährdeten“ Masse an mineralischem Abbruchmaterial ist, die aufgrund des Gipsputzes nicht verwertet werden kann und deponiert werden muss. Bei Annahme von Kosten für das Hochdruckwasserstrahlen von 1000 DM/t lohnt sich das Verfah-

⁴⁸⁵ Die Rohdichte des erhärteten Putz liegt zwischen 0,8 t/m³-- 1,2 t/m³. (Bundesverband Gips, 1995, S. 25)

⁴⁸⁶ vgl. Schultmann (1998, S. 85 ff.)

ren dann, wenn die zu deponierenden Gesamtmenge mindestens 15 mal so groß ist wie die Masse an zu bearbeitendem Putz. Lassen sich hingegen Verfahren finden, die mit Gipsputz belasteten Innenwände komplett auszubauen und zu deponieren, um dadurch eine weitergehende Belastung anderer Materialien zu verhindern, könnte dies angesichts der hohen Kosten für das Hochdruckwasserstrahlen günstiger sein.

Die Parametersensitivität hinsichtlich der Deponierungskosten ist jedoch weiterhin groß. Nimmt man im oben genannten Beispiel Deponierungskosten von 200 DM/t an, lohnt sich das Hochdruckwasserstrahlen bereits, wenn die „gefährdete“ Menge nur achtmal größer ist als die Menge des Gipsputzes.

Die Situation im Bereich der gipsgebundenen Putze, Mörtel und Estriche bleibt trotzdem unbefriedigend. Zum einen ist es erforderlich, möglichst rasch Verfahren zu finden, die eine kostengünstigere Trennung des Putzes vom Untergrund ermöglichen. Zum zweiten ist auch der Verbleib der Baugipse als zu deponierendes Material unbefriedigend, da es bislang nicht gelingt, die bestehende Gipsverbindung zu nutzen. Hier kann das in Kapitel 6.3.4.1 näher beschriebene Müller-Kühne-Verfahren eine Möglichkeit darstellen, das in der Lage ist, aus den Abfallgipsen die Produkte Schwefelsäure und Zement herzustellen. Auch ist eine Entwicklung erforderlich, damit aus den abgetrennten Baugipsen wieder eine Einschleusung in den Gipsproduktkreislauf erfolgen kann. Derartige Verfahren dürften insbesondere dann an Attraktivität gewinnen, wenn die Trennung des Putzes vom Untergrund bereits während der Abbruchphase erfolgt. Zum dritten ist im Bereich der Putze, Mörtel und Estriche eine verstärkte Einbringung von Substitutionsmaterialien zu fordern, solange die Reduktionskonzepte aus technischen, aber auch aus wirtschaftlichen Gründen noch derart vage bleiben. Ansatzpunkte hierfür sind kalkgebundene Putze und Mörtel sowie Mörtel und Estriche auf Zementbasis.

6.3.4 Neue Recyclingverfahren für Gipsprodukte

6.3.4.1 DAS MÜLLER-KÜHNE-VERFAHREN

Das Müller-Kühne-Verfahren ist ein auf das Jahr 1915 zurückgehender Prozess zur Gewinnung von Schwefelsäure und Zement aus einem Schwefelträger, einem Siliciumträger u.a. sowie einem Kohlenstoffträger. Während in den frühen Jahren hierfür Naturrohstoffe eingesetzt wurden (Anhydrit, Ton, Sand, Eisenoxyd und Koks), werden heute zu 95 % Abfälle zur stofflichen Verwertung eingesetzt wie Rauchgasentschwefelungsprodukte aus dem Sprühabsorptionsverfahren (SAV-Produkt), Gipse verschiedener Herkunft (Chemiegipse, Bauausbruchgipse, Modellformengipse), Aschen, Filterstäube, gebrauchte Schwefelsäure, Keramikschrott oder Eisenoxyde. Zur Verbrennung werden zu 100 % Sekundärbrennstoffe wie Lösemittelgemische, Altöle, Destillationsrückstände und Säureteer, aber auch noch Braunkohlestaub verwendet. Die inzwischen erzielte Verwertungsquote der Abfälle beträgt bei Leistungsbetrieb nahezu 100 %, dazu werden von der Verbrennungsanlage die strengen Grenzwerte der 17. BImSchV eingehalten⁴⁸⁷.

Das Verfahren beruht auf der chemischen Spaltung von Calciumsulfat unter reduzierenden Bedingungen im Drehrohrofen oberhalb von 700°C. Etwa in der Mitte des Drehrohrofens ist die Temperaturzone erreicht, in der die chemische Spaltung von CaSO_4 in CaO und SO_2

⁴⁸⁷ Zur Beschreibung des Müller-Kühne-Verfahren vgl. Meininger (1997)

erfolgt. Die flüchtigen Bestandteile SO_2 und CO_2 ziehen mit dem Rauchgas ab, während das gebildete CaO mit den anderen Komponenten Al_2O_3 , SiO_2 und Fe_2O_3 im Sinterteil des Drehrohrofens zu Zementklinker gebrannt wird. Das Rauchgas wird gereinigt und das SO_2 katalytisch zu SO_3 oxidiert, um im Absorber Schwefelsäure bzw. Oleum zu generieren.

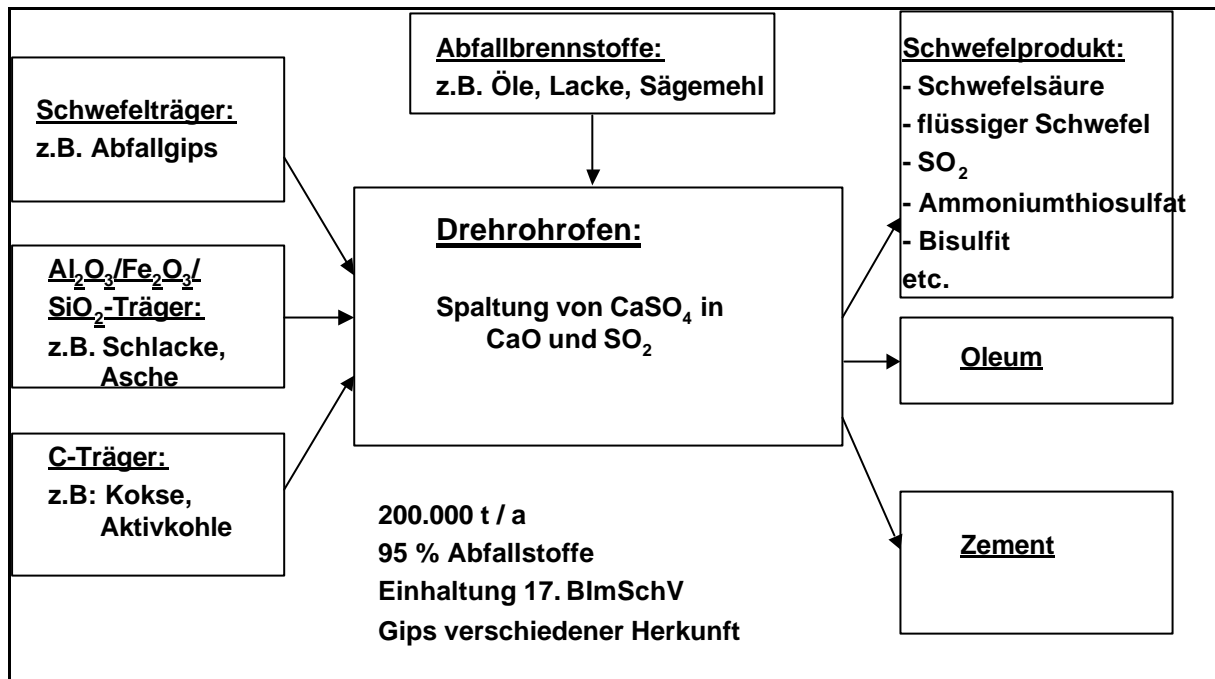


Abbildung 6.4: Prinzip des Müller-Kühne-Verfahrens

Die Wirksamkeit dieses Verfahrens für Gipsabfälle aus dem Bauwesen wurde bereits in einem Versuch mit 80 t Gipskartonplatten nachgewiesen⁴⁸⁸. Dazu lassen sich Gipskartonplatten über eine Kugelmühle und einen Sichter in die Einzelbestandteile Gips und Karton trennen. Insgesamt gelten für das Verfahren als Rahmenbedingung die Vorgaben geringer organischer Verunreinigungen (< 5 Gew. %) sowie die Begrenzung der Menge an CaCl auf ca. 1 Gew.-%⁴⁸⁹.

Zur Zeit steht eine Anlage im Industriepark Bitterfeld, die nach dem Müller-Kühne-Verfahren arbeitet und aus den umliegenden Industriebetrieben ihre Reststoffe bezieht. Sie kann in zwei Ofenstraßen jährlich bis zu 200.000 t mineralische Reststoffe, 20.000 t gebrauchte Schwefelsäure und 40.000 t Brennstoffe zu 100.000-130.000 t Zement und 70.000-100.000 t Schwefelsäure verarbeiten.

Der Betrieb der Anlage rechnet sich zur Zeit ohne ausreichende Abfallgebühren nicht. Obwohl der Bezug der Einsatzstoffe im wesentlichen durch Vergütung der Ablieferer durch Andienungsgebühren erfolgt, können die Kosten für den Betrieb und den Unterhalt der Anlage und die Transportkosten für die angedienten Reststoffe von den Umsatzerlösen nicht gedeckt werden. Hierfür gibt es mehrere Gründe:

- Die Anlagenkapazität wird nicht ausgenutzt, da noch immer viele Abbruchunternehmer, die nach dem Gesetz die entsorgungspflichtigen Abfallerzeuger darstellen, über eigene Deponien verfügen, auf denen die gipshaltigen Abbruchmaterialien sehr kostengünstig

⁴⁸⁸ vgl. Meininger (1997, S. 38)

⁴⁸⁹ Hingegen können Anhaftungen von Putz, Sand, Kacheln etc. bis zu einem Anteil von 10 Gew.-% toleriert werden.

abgelagert werden können. Dies gilt mindestens noch so lange, bis das Verbot der TA Siedlungsabfall zur Deponierung von vermischtem Bauschutt im Juni 2001 greift.

- Ein großer Teil der Andienungsgebühren (z.B. für Gipskartonplatten ca. 50-60 DM/t, für Sprühabsorptionsprodukte 70 DM/t) wird von den Transportkosten für diese Materialien aufgezehrt, da der Anlagenstandort im Verhältnis zu den Zentren des Abfallanfalls sehr ungünstig liegt.
- Der Absatzpreis für Zement muss mit dem Preis herkömmlicher Zementwerke konkurrieren, obwohl der Energiebedarf beim Müller-Kühne-Verfahren etwa doppelt so hoch ist.
- Der Markt für das Endprodukt Schwefelsäure ist praktisch zusammengebrochen, da die früheren Verwender von Schwefelsäure in den Bereichen Düngemittelproduktion, Textilindustrie und Munitionsindustrie kaum noch Schwefelsäure abnehmen. Zusätzlich besteht Überkapazität durch die Konkurrenz anderer Verfahren zur Aufbereitung von gebrauchten Schwefelabfällen, Säuren aus der Rauchgasentschwefelung oder Dünnsäureaufarbeitung. Wichtigster Großabnehmer ist zur Zeit die organisch-chemische Industrie. Aufgrund der Rezession im Markt ist der erzielbare Preis für Schwefelsäure auf 50-70 DM/t gesunken⁴⁹⁰.

Das Müller-Kühne-Verfahren bietet trotz der gegenwärtigen Schwierigkeiten enorme Möglichkeiten, kreislaufwirtschaftliche Grundsätze für eine Reihe derjenigen Materialien zu realisieren, die sinnvollerweise keiner anderen Verwertung zugeführt werden können. Wesentlich trifft dies auf die gegenwärtig schon im Stofflager Bauwesen befindlichen Putze, Mörtel und Estriche zu, aus denen sich mit Hilfe dieses Verfahrens neue Produkte gewinnen lassen könnten, ohne dass die Materialien zu jetzt bereits hohen und später wahrscheinlich noch höheren Kosten deponiert werden müssen. Insbesondere angesichts des zunehmenden Anfalls dieser Stoffe in den nächsten Jahren und Jahrzehnten, der sich von etwa 1 Mio. t/a im Jahr 2000 über 1,5 Mio. t/a im Jahr 2010 auf über 2 Mio. t/a im Jahr 2020 entwickeln dürfte, ist es erforderlich, das Müller-Kühne-Verfahren als geeignete Senke für den Verbleib dieser Stoffe weiterzuentwickeln und kapazitiv anzupassen. Zu dieser Weiterentwicklung gehören folgende Aufgabenstellungen:

- Aufklärung des im Drehrohrofens ablaufenden Chemismus als Voraussetzung für die Entwicklung von kleineren Anlagenkapazitäten und zur Optimierung der Technologie
- Entwicklung von Anlagen mit kleineren Kapazitäten, etwa im Bereich 50.000 t/a
- Identifikation neuer Produktalternativen für Schwefel. Ansatzpunkte sind flüssiges SO₂ für die chemische Industrie (Verkaufspreis z.Zt. etwa 200 DM/t) oder Ammoniumthiosulfat zur Schwefeldüngung. Neben neuen Produkten könnten auch neue Märkte für Schwefelsäure und andere Schwefelprodukte, etwa in China, erschlossen werden.
- Logistische Planung der Standorte und Kapazitäten von Anlagen, so dass die Kosten für Transport, Aufbereitung und Verkauf minimal werden. Diese Planung orientiert sich wesentlich an den Zentren des Anfalls gipshaltiger Abfälle in Deutschland.

⁴⁹⁰ Mündliche Auskunft Hr. Meininger, 22.12.1998. Förstner hatte noch ein Marktpotenzial in Deutschland von etwa 3 Mio. t Schwefelsäure erwartet (1994, S. 412). Davon sollte etwa 20 % aus Reststoffen der Rauchgasentschwefelung gedeckt werden (650.000 t), von denen 470.000 t in der organisch-chemischen Industrie, 70.000 t in der anorganisch-chemischen Industrie, 70.000 t für die Düngemittelherstellung sowie 40.000 t in der nicht-chemischen Industrie (Textil) verwendet werden sollten.

Das Problem der logistischen Planung hinsichtlich Standort- und Kapazitäts- bzw. Transportoptimierung wird durch das in der Optimierungsrechnung bekannte Warehouse-Location-Problem (WLP) gelöst, einem gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodell, das in seiner klassischen Form die Fragestellung aufgreift, wie der Vertrieb für ein Unternehmen mit verschiedenen Produktionsstätten zu optimieren ist, wobei zu entscheiden ist, von welchen Lagern eine fest vorgegebene Nachfrage bedient werden soll⁴⁹¹. Erweiterungen und Adaptationen des WLP sind vielfältig vorhanden, eine aus Püchert⁴⁹² entnommene Notation zur Planung von Kreislaufwirtschaftssystemen unter Berücksichtigung von Erlös- und Entsorgungskosten ist in Anhang 4 enthalten. Er berücksichtigt Besonderheiten wie die mit zunehmender Anlagenkapazität abnehmende spezifische Kostenfunktion sowie ihre stückweise Linearität innerhalb von Intervallen von Anlagenkapazitäten. Diese Eigenschaften sind auch bei der Planung von Standorten und Kapazitäten für Müller-Kühne-Anlagen zutreffend.

Zur Lösung derartiger gemischt-ganzzahliger Optimierungsaufgaben bieten sich heuristische und exakte Lösungsverfahren an. Als effizient hat sich für die meisten Problemstellungen das Branch-and-Bound-Verfahren herausgestellt, bei dem zunächst jeweils Teilmengen des relaxierten Problems (ohne Berücksichtigung der Ganzzahligkeit) gebildet werden, für die eine Lösung gesucht wird. Ist die Lösung des Teilproblems schlechter als die bisherige beste Lösung der Teilprobleme, braucht das Teilproblem nicht weiter betrachtet zu werden⁴⁹³.

Für die Lösung dieser Problemstellung, die nur mit Hilfe eines Rechners durchgeführt werden kann, werden folgende Angaben benötigt:

- Entfernungstabelle. In einem Modell von Deutschland sind zunächst „Anfallsammelzentren“ zu identifizieren, an denen jeweils eine bestimmte Menge an Abfall im Jahr anfällt. Dies sollten für den Anfang Ballungszentren und Landeshauptstädte sein. Ferner sind die Entfernungen zwischen den einzelnen Anfallsammelzentren zu bestimmen.
- Abfallanfall. Für jedes Anfallsammelzentrum ist die Menge an Abfall zu hinterlegen.
- Transportkostenfunktion. Die Kosten für den Transport sind abhängig von der Masse, der Entfernung und dem gewählten Verkehrsmittel. Als erste Näherung kann zunächst ein Satz von 0,25 DM/tkm für den Lkw-Transport zugrunde gelegt werden. Auch andere Verfahren sind hier denkbar wie die Annahme einer entfernungsabhängigen Formel zur Berechnung der Transportkosten⁴⁹⁴ oder eine näherungsweise Aufteilung der Transportkosten nach Straßentransport, Schienentransport oder Schiffstransport.
- Verarbeitungsanlagen. Für die Verarbeitungsanlagen sind zunächst Kapazitätsklassen festzulegen (z.B. 30.000-40.000 t, 40.000-50.000 t usw.) und für jede Kapazitätsklasse die fixen und die variablen Kosten zu bestimmen⁴⁹⁵.
- Output-Produkte. Für jedes Produkt aus der Verwertung sind die Kosten bzw. Erlöse und die maximalen Mengen zu bestimmen. Auch sollte die Deponie mit aufgenommen wer-

⁴⁹¹ Grundlagen des WLP sind in vielen Standardwerken dargestellt wie z.B. bei Neumann/Morlock (1993) bzw. Zimmermann, W. (1989)

⁴⁹² vgl. z.B. Püchert (1995, S. 146 ff.)

⁴⁹³ Auch das Branch-and-Bound-Verfahren ist Bestandteil von Standardwerken der linearen Optimierungsrechnung.

⁴⁹⁴ Siehe etwa Schultmann (1998, S. 97). Er formuliert für Lkw -Transporte über 20 km, die in der Regel als Zugverband gefahren werden, eine auf Basis der Kostentabelle des Bundesverbands Güternahverkehr abgeleitete Berechnungsgleichung: $c(d) = -0,0005 d^2 + 0,2986 d + 2,405$. Die Exaktheit der Formel besticht und ihre empirische Grundlage ist deutlich zu erkennen, allerdings wird eine nicht zu rechtfertigende Genauigkeit vermittelt.

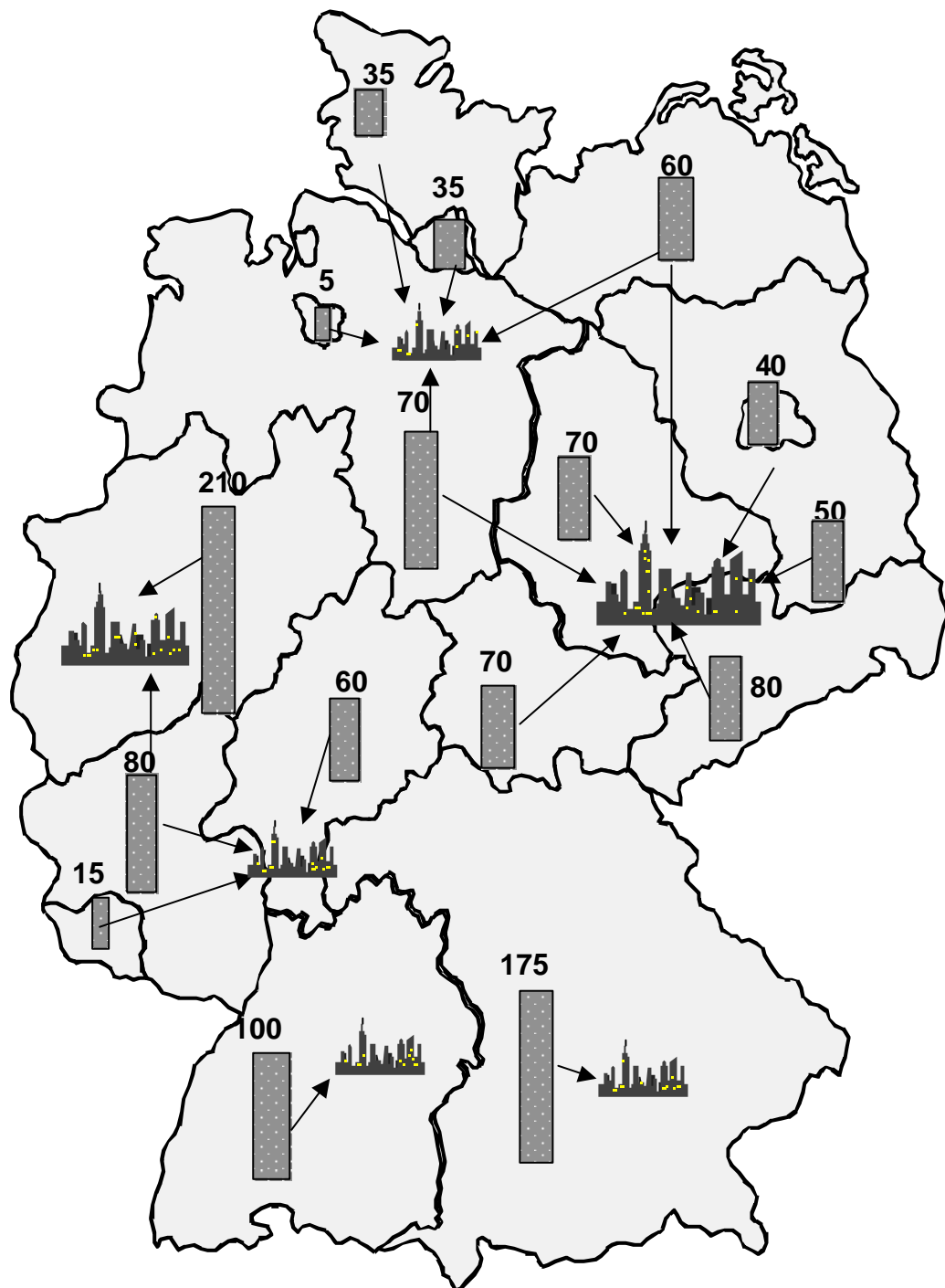
⁴⁹⁵ Zu den variablen Kosten zählen auch die Kosten bzw. Erlöse für Einsatzstoffe, also auch Annahmgebühren für Gipschutt.

den, um ggf. eine „Bypass-Lösung“ ohne Inanspruchnahme der Verarbeitungsanlagen im Modell vorsehen zu können, falls sich deren Unwirtschaftlichkeit herausstellen sollte⁴⁹⁶.

In Abbildung 6.5 werden zunächst die statistisch erfassten Mengen an Abfallgips aufgeteilt, die im Jahr 1996 in den Bundesländern rechnerisch angefallen sind. Im Vergleich zu den tatsächlich erfassten Mengen (etwa an Bauschutt aufbereitungsanlagen) dürften diese Werte etwa doppelt so hoch liegen.

In einer ersten Näherung ergeben sich dabei neben der bereits bestehenden Anlage in Bitterfeld weitere Anlagenstandorte in den Ballungszentren Nord, Rhein/Ruhr, Rhein/Main, Stuttgart und München. Die Anlagenkapazitäten sollten so gestaltet sein, dass in einer Ofenstraße eine Größenordnung von 50.000 t pro Jahr nicht überschritten werden sollte. Dies liegt daran, dass von den genannten Größenordnungen höchstens 20 % als realistische Menge für das Verfahren kalkuliert werden können, da rund 50 % der Menge voraussichtlich gar nicht als Bauschutt deklariert an Bauschutt aufbereitungsanlagen oder Deponien erscheint, weiterhin ein Teil der Mengen als Gipsplatten anfällt, für die die Möglichkeit der Wiederverwertung auf der gleichen Stufe besteht, und drittens ein Teil der in Frage kommenden Putze, Mörtel und Estriche nicht in gewünschter Form vorliegt, da er nicht abgetrennt wurde oder stark verunreinigt ist, insbesondere mit organischen Zusätzen. Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung der Abfallmengen, die sich im Jahre 2010 gegenüber 1996 verdoppeln dürften und der erwarteten weiteren Verdoppelung auf 2 Mio. t an Abfallgips in Putz, Mörtel und Estrich im Jahr 2020 empfiehlt sich die Hinzunahme weiterer Ofenstraßen an den gleichen oder neuen Anlagenstandorten bei Bedarf.

⁴⁹⁶ Aufzunehmen sind die Abnahmepreise für Schwefelsäure (50-70 DM/t), Zement (mindere Qualität), Oleum (150 DM/t) und flüssiges SO₂ (200 DM/t) sowie entsprechende absetzbare Maximalmengen, insbesondere für Schwefelsäure und flüssiges SO₂



Geschätzte Verteilung der jährlichen Gipsabfallmengen auf Bundesländer (relativ zur jeweils entsorgten Bauabfallmenge). Basis 1996: ca. 1,2 Mio. t insgesamt

Abbildung 6.5: Mögliche Anlagenstandorte für das Müller-Kühne-Verfahren

6.3.4.2 MIKROWELLEN ZUM ABTRAG VON BESCHICHTUNGEN IM BAUWESEN

Ziel eines derzeit geplanten Forschungsvorhabens zum Einsatz von Mikrowellen im Bauwesen ist es, den Abtrag mineralischer Schichten, wie Putze, Estriche und Fliesen von Beton unter weitgehender Schonung der Tragstruktur und der Umwelt zu studieren⁴⁹⁷. Durch einwirkende Mikrowellen sollen geschichtete Materialien abschnittsweise jeweils einige Zentimeter tief und lokal begrenzt oberflächennah aufgeheizt werden. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit mineralischer Materialien stellen sich steile Temperaturgradienten und bei entsprechender Steifigkeit auch steile Spannungsgradienten ein, die zum Abplatzen von Beschichtungen führen. Die Wirksamkeit des Verfahrens ist abhängig von den Frequenzen und der Leistungsdichte der Mikrowellen, der Struktur und den Absorptionseigenschaften des Tragwerks sowie in geringem Umfang auch vom Wassergehalt des Materials. Die Mikrowellen-Strahlenbelastung in die Umgebung lässt sich durch Anbringen einer metallischen Haube zur Abschirmung minimieren. Versuche in England mit entsprechenden Anlagen haben gezeigt, dass der dort erlaubte Wert von 10 mW/cm² unterschritten werden konnte.

In ersten Versuchsreihen, die in einer Laboranlage durchgeführt wurden, wurden 10 Betonplatten mit einer Grundfläche von 20x20 cm² Gipsputz jeweils mit und ohne Vornässen binnen weniger Sekunden praktisch restlos vom Unterbeton abgelöst. Bei Versuchsreihen zur Ablösung von Fliesen auf Mauerwerk stellte sich der Ablöseeffekt erst nach einige Minuten und nicht mehr im vollen Umfang ein. Grund hierfür ist vermutlich die zu geringe Steifigkeit des Mauerwerks, um die notwendigen Spannungen hinter den Fliesen aufzubauen.

Um für den Einsatz bei der Behandlung von Baugipsen im Abfallstrom von Bedeutung zu sein, ist es erforderlich, ein portables Gerät zum Einsatz auf der Baustelle zu entwickeln, da nur eine unmittelbare Trennung des Putzes im Rahmen des Rückbaus zu einer gesicherten qualitativ hochwertigen Verwertungsmöglichkeit für die restlichen mineralischen Stoffe im Hinblick auf den Sulfatgehalt führt. Ferner sollte eine Absaugung des abgetrennten Materials durch die Anlagen vorgesehen werden, um somit auch möglichst sortenreinen Gipsputz gewinnen zu können, der einer weiteren Verwertung zugeführt werden kann. Hinsichtlich der Kosten konkurriert das Verfahren mit dem derzeit angewendeten Hochdruckwasserstrahlen, das einen Aufwand von etwa 15-45 DM/m² Wandfläche entsprechend etwa 1.000-2.000 DM/t Abbruchgips erfordert. Allerdings kann durch die sortenreine Erfassung des Materials ohne Vermischung mit Wasser und Schlamm eine bessere Verwertung angestrebt werden, weswegen die Deponierungskosten für nicht recyclingfähiges Material in einer Größenordnung von zur Zeit 75-200 DM/t (bei einer durchschnittlichen Schichtdicke des Putzes von 25 mm entsprechend 2-5 DM/m²) entfallen dürften. Ähnlich wie beim Hochdruckwasserstrahlen dürfte das Einsatzgebiet sich hauptsächlich auf großflächige Wände und Böden erstrecken.

⁴⁹⁷ Zu den Ausführungen vgl. Link/Feher (1999)

6.4 Zusammenfassung

Allein durch die bereits im Bauwesen befindlichen Gipsprodukte wird anhand des Modells zur Beschreibung des Stofflagers und der Stoffströme deutlich, dass bis zum Jahr 2050 der absolute Abfallstrom an Gips kontinuierlich zunehmen wird. Besonders stark wird der Abfallstrom ab dem Jahr 2030 anschwellen, wenn die seit 1985 aus der Rauchgasentschwefelung stammenden Gipsmengen in die Reduktion gelangen.

Gleichzeitig kann, je nach Szenario, ab 2020, spätestens ab 2030 die Gipsnachfrage das Gipsangebot übersteigen. Die Versorgung mit Gips ist bedingt durch den Rückgang der REA-Gipsmengen aus der Kohleverbrennung. Auf der anderen Seite sind die Naturgipsvorräte in Deutschland begrenzt, bei gleichbleibender Förderung besitzen die bekannten Vorräte eine Reichweite von etwa 60-100 Jahren. Der Außenhandel besitzt aufgrund des geringen spezifischen Werts von Gips gegenwärtig nur eine geringe Bedeutung.

Der prognostizierte Stoffstrom Gips zeigt ohne ein gezieltes Management, dass im Jahr 2050 sowohl eine Versorgungslücke bis zur Hälfte der möglichen Nachfrage als auch eine hohe Welle an Abfallgipsen zu erwarten ist, die ohne nennenswerten technischen Fortschritt nicht im Kreislauf gehalten werden kann. Daher sind differenzierte Maßnahmen des Stoffstrommanagements erforderlich:

- Keine Vergabe weiterer Abbaulizenzen für Naturgips, um die vorhandenen Reserven auch für künftige Generationen verfügbar zu machen.
- Keine Erhebung von Ressorcensteuern, da diese bereits zum jetzigen Zeitpunkt einen erheblichen Markteingriff bedeuten, obwohl die Engpasssituation erst ab 2020 eintritt.
- Stärkere Nutzbarmachung von REA-Gipsen aus anderen Verbrennungsanlagen.
- Freiwillige Selbstbeschränkung der in Umlauf gebrachten REA-Gipsmengen auf 3 Mio. t pro Jahr. REA-Gipsmengen, die über diese Grenze hinaus gehen, sollten in Monodeponien als künstliche Lagerstätte für spätere Bedarfe eingebracht werden. Auch hierbei ist von einem staatlichen Eingriff abzuraten wie der Abnahme dieser Mengen abzuraten, da der Staat als Eigentümer und späterer Marktteilnehmer auftritt. Sinnvoll erscheinen jedoch staatliche Einlagerungsprämien, die eine Kompensation für Einrichtung und Betrieb der Deponien darstellen.
- Auf der Seite der Reduktionswirtschaft müssen Preissignale durch eine Erhöhung der Annahmegebühren für gipshaltigen Bauschutt gesetzt werden. In diesem Fall werden bereits bestehende technologische Verfahren rentabel und die durch einen zu hohen Gipsanteil verursachten ökologischen Beeinträchtigungen für das Grundwasser reduziert.
- Für Gipsplatten mit verhältnismäßig niedrigen Dispersionsgraden steigt der Abfallstrom kontinuierlich an. Neben den Preissignalen durch erhöhte Annahmegebühren entstehen durch die größeren Mengen Potentiale für eine rentable Kreislaufführung, die wiederum zur Deckung der Versorgungslücke beitragen kann.
- Den langfristig größten Effekt für ein effizientes Stoffstrommanagement von Gips hat eine recyclinggerechte Produktgestaltung mit dem Ziel, den Dispersionsgrad der Gipsprodukte zu senken und die Lebensdauer der Produkte zu erhöhen. Werden Produkte wie Gipsfaserplatten, Verbundestrich sowie imprägnierte Gipsplatten zur Wärmedämmung nicht mehr hergestellt, sinkt der Anteil von Gipsprodukten mit ungünstigen Dispersionsgraden

bis 2050 auf rund 35 %, etwa die Hälfte gegenüber heute. Gleichzeitig steigt der Anteil der Gipsprodukte mit günstigen Dispersionsgraden auf 35 %. Ein signifikanter Effekt setzt jedoch nicht vor dem Jahr 2030 ein.

- Zur Etablierung einer recyclinggerechten Produktgestaltung eignen sich insbesondere informatorische Maßnahmen wie Akteurskooperationen zwischen Rohstofflieferanten, Produktherstellern, Bauausführenden, Architekten, Handwerksbetrieben und Bauschuttauftbereitern. Ergänzt wird dies durch intensivere Ausbildung sowie Information der Nutzer. Ökonomische Maßnahmen wie Steuern oder Abgaben auf Produkte, die ungünstige Dispersionsgrade aufweisen, eignen sich nicht, da sie ständig an neue Produkte oder neue Technologien adaptiert werden müssten und ihre Höhe nicht einen zukünftigen reduktionswirtschaftlichen Aufwand widerspiegelt.

7. THESENARTIGE ZUSAMMENFASSUNG

Welche Erkenntnisse lassen sich aus den gemachten Überlegungen zum Stoffstrommanagement im Baubereich und zur Unterstützung der Reduktionswirtschaft ableiten? Welche zukünftigen Ereignisse können durch heutiges Handeln beeinflusst werden, und für welche zukünftigen Stoffströme muss bereits heute Vorsorge getroffen werden? In den nachfolgenden Thesen wird auf einige dieser Fragestellungen als Ergebnis dieser Arbeit eingegangen.

These 1:

Stoffstrommanagement ist eine primär sozialwissenschaftliche Aufgabenstellung

In Kapitel 2 wurde gezeigt, dass sich Stoffstrommanagement als Maßnahmenbündel zur Gestaltung und Lenkung von Stoffströmen in und durch soziale Systeme wie Haushalte, Unternehmen und Staat vollzieht. Die Handlungsfelder des Stoffstrommanagements liegen entlang des Lebenszyklus von Produkten und betreffen insbesondere die in den einzelnen Stufen involvierten Akteure. Dabei wird Stoffstrommanagement umso effizienter sein, je mehr es in der Lage ist, Anforderungen und Bedürfnisse von Akteuren unterschiedlicher Wertschöpfungs- und Produktlebensstufen miteinander zu verbinden, gemeinsam mit ihnen ein verbindliches Ziel zu formulieren und laufend Informationen für die Beteiligten zur Verfügung zu stellen. Am Beispiel Gips wird deutlich, dass die Stoffstromoptimierung der Kraftwerksbetreiber (Vermeidung von gasförmigen Schwefelemissionen durch Rauchgasentschwefelung und Vermarktung des entstehenden Gipses) eine Verschiebung der Problemstellung an das Ende des Lebenszyklus der Gipsprodukte bewirkt. Die naturwissenschaftliche Komponente von Stoffstrommanagement stellt eine unveränderliche Rahmenbedingung dar und dient lediglich der Systemidentifikation, die technologische Komponente ist eine Form der Realisierung der sozialwissenschaftlich geprägten Zielformulierung.

These 2:

Die Reduktionswirtschaft als Komplement der Produktionswirtschaft stellt die Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft zu einem nach betriebswirtschaftlichen Kriterien handelnden Sektor dar. Der Dispersionsgrad ist eine wichtige Größe für die reduktionswirtschaftliche Planung

Zu Recht richtete sich das Augenmerk in den letzten Jahren auf die Ausgestaltung und Optimierung der Entsorgung, da hier gegenüber der Versorgung ein Nachholbedarf zu erkennen war. Diese Fokussierung der Abfallwirtschaft behandelte zunächst stoffliche und ökologische Fragestellungen mit Hilfe von technischen Lösungsansätzen. Die Reduktionswirtschaft greift die Bedeutung der Entsorgung der natürlichen Prozesse auf und formuliert einen eigenen betriebswirtschaftlichen Rahmen. Innerhalb dieses Rahmens stellt der Abfall aus der Technosphäre die wesentliche Planungsgröße für den Input dar. Der Dispersionsgrad als dimensionsloses, qualitatives Beschreibungsmaß der Eignung von Stoffen für die Kreislaufführung bildet alle wesentlichen Parameter ab, anhand derer der Reduzent seinen Erfolg plant. Hierzu gehören neben dem zu leistenden technologischen Aufwand für die Reduktion von Stoffen Aussagen über die Wettbewerbsstellung der reduzierten Güter, Hinweise zur ökologischen Beschaffenheit sowie Anhaltspunkte über die zukünftige Marktsituation.

These 3:**Die aktuelle Datenlage im Bauwesen kann bestenfalls Richtungen für ein effizientes Stoffstrommanagement aufzeigen**

Wie aus Kapitel 3 ersichtlich wird, erlauben die langen Zeiträume, die großen Massen und die große Anzahl von Beteiligten im Bauwesen nur sehr grobe Abschätzungen über die Größenordnungen von Stoffströmen im Bauwesen. In bezug auf die Zeiträume ergibt sich die Schwierigkeit, dass in unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus eines Bauwerks Materialien aus verschiedenen Zeiträumen zusammenfallen, die in der Regel schlecht dokumentiert oder gar nachweisbar sind. Ferner müssen Ansätze gefunden werden, wie Inverkehrbringer von Stoffen trotz der langen Verweilzeiten der Stoffe im Bauwesen eine Verpflichtung für den Stoff im Sinne der Kreislaufwirtschaft bekommen. Sowohl mit Top-Down- als auch mit Bottom-Up-Ansätzen ermittelte Stoffströme differieren zum Teil sehr deutlich voneinander, so dass davon ausgegangen werden muss, dass ein bedeutender Teil der Stoffströme bislang noch gar nicht erfasst werden konnte. Die große Anzahl der Akteure im Bauwesen macht es schwierig, geeignete organisatorische Maßnahmen des Stoffstrommanagements einzusetzen. Eine Optimierung verlangt gerade hier umfassende informatorische Maßnahmen.

These 4:**Die Systemdarstellung von Stoffströmen und Stofflagern reduziert die Datenunsicherheit im Bauwesen und macht Problemstellungen transparent**

Die hohe Datenunsicherheit im Bauwesen kann durch die konsequente Anwendung einer systembasierten Darstellungsweise reduziert werden. Hierdurch können Annahmen verifiziert, unterschiedliche Ansätze validiert und nicht berücksichtigte Ströme und Lager identifiziert werden. Durch die Betrachtung der Ströme und Lager im Zeitablauf können Indizien für die durchschnittliche Lebensdauer von Bauprodukten ermittelt werden, die eine wesentliche Größe für Aussagen zukünftiger Stoffströme darstellt. Letztlich unterstützt die systemische Darstellung durch den Vergleich mit Stoffströmen in anderen Sektoren, in anderen Stufen anthropogener Wertschöpfung sowie im Vergleich zur gesamten Anthroposphäre die Bewertung des anthropogenen Handelns.

These 5:**Durch die langen Verweilzeiten von Stoffen im Bauwesen und den daraus resultierenden enormen Lagerbestand zeigt sich die Wirkung von Maßnahmen an der Quelle der Stoffströme erst sehr spät**

Maßnahmen, die an der Quelle der Stoffströme, also beim Eintritt in die Technosphäre ansetzen, haben langfristig zwar den größten Einfluss auf eine umweltgerechte Gestaltung des Stoffflusses, können hinsichtlich ihrer Wirkung allerdings erst nach sehr langen Zeiträumen beurteilt werden. Andererseits ist es erforderlich, Maßnahmen für weitere Stufen des Stoffstroms, etwa im Recyclingbereich, zu entwickeln, deren Wirkung zwar unmittelbarer ersichtlich, aber gegenüber den Maßnahmen zu Beginn des Stoffstroms möglicherweise weniger effizient sind. Dies sind die wesentlichen Aussagen, die aus der kohortenanalytischen Darstellung der Lagerdynamik in Kapitel 4 gewonnen werden können. In diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung ist der Aufbau einer aktiven Lagerbewirtschaftung im Bau-

wesen, die sich unter Betrachtung des räumlich-zeitlichen Vorliegens der Stoffe den Fragen eines ökologisch-ökonomisch sinnvollen Wiedereinsatzes im Kreislauf stellt. Danach sollten grundsätzlich die im technosphärischen Bauwesen befindlichen Güter und Stoffe nach Möglichkeit möglichst lange auf gleichem Nutzungsniveau verwendet werden. Gerade angesichts der langen Verweilzeiten müssen Baumaßnahmen sorgfältig im Hinblick auf zukünftige Wirkungen untersucht werden, damit bereits heute schon das Verantwortungsbewusstsein für die nächste und übernächste Generation entwickelt wird. Für den Baustoff Gips befinden sich Recyclingansätze jedoch erst im Aufbau, hier laufen zunächst planerische Überlegungen für eine adäquate Infrastruktur in der Zukunft.

These 6:

Etwa ab dem Jahr 2030 kommt es in Deutschland bei einem unveränderten Gipsbedarf zu einer Gipsknappheit

Obwohl gegenwärtig keine Versorgungsengpässe mit Gips aufgrund der Rauchgasentschwefelung zu verzeichnen sind, dürfte ab dem Jahr 2030 die Nachfrage nach Gips das Angebot übersteigen. Ursachen hierfür liegen im Rückgang der Energieerzeugung aus heimischer Kohle sowie in einem Rückgang der deutschen Rohstoffvorräte bei einem gleichzeitig nur geringen Rückgang der Nachfrage aus dem Baubereich. Außenhandel mit Gips ist aufgrund des niedrigen spezifischen Produktpreises nur bedingt möglich. Es ist daher angesichts der langen Verweilzeiten im technosphärischen Lager unabdingbar, bereits heute Gipsprodukte so zu entwickeln, dass sie günstige Dispersionsgrade aufweisen und damit für eine wirtschaftliche Kreislaufführung zur Verfügung stehen, um die Versorgung mit Gips sicherzustellen. Um die heutigen Rohstoffvorräte an Naturgips möglichst lange verfügbar zu halten, sollte angesichts der intergenerationalen Gerechtigkeit der Abbau von Naturgips möglichst rasch auf ein Maß reduziert werden, das aus technologischer und sozialer Sicht verträglich ist. Dies bedeutet einen jährlichen Rückgang des Naturgipsabbaus um etwa 1 %.

These 7:

Anstatt einen Großteil des aus industriellen Prozessen als Nebenprodukt anfallenden Gipses zu verwerten, sollte ein Teil des Gipses in anthropogenen Lagerstätten als Reserve für zukünftige Generationen eingebracht werden

Insbesondere beim seit etwa 15 Jahren verstärkt anfallenden Gips aus der Rauchgasentschwefelung ist zu beobachten, dass aufgrund des extrem günstigen Preises ein Maximum der Mengen zu Produkten weiterverarbeitet und ins Lager Bauwesen eingebracht wird. Ähnliches gilt auch für den Gips, der in Bergwerkstollen eingeblasen wird und damit unwiederbringlich dispergiert wird. Statt einer maximalen Verwertung des Stoffes sollte jedoch nur derjenige Teil zu Produkten verarbeitet werden, der hinsichtlich seiner Dispersion mit anderen Materialien zu verträglichen Durchmischungsgraden im Hinblick auf eine spätere Rückführung führt. Aktuell nicht benötigte Mengen sollten in Monodeponien als Rohstoffreserve eingebracht werden. Bei der Auswahl geeigneter Standorte für Monodeponien sollten ökologische Kriterien (insbesondere wasserwirtschaftliche Unbedenklichkeit) sowie ökonomische Kriterien im Sinne einer optimierten Logistik (kurze Transportwege) berücksichtigt werden. Somit lassen sich in Zeiten eines Überschusses auf der Angebotsseite geeignete Reserven für die Befriedigung zukünftiger Bedarfe schaffen. Ein geeignetes Instrumentarium zur Errei-

chung dieses Ziels ist eine freiwillige Selbstbeschränkung der beteiligten Akteure im Stoffstrom Gips. Impulse seitens des Abfallrechts können flankierend wirken.

These 8:

Bei der Beseitigung von Bauschutt muss stärker als bisher auf Gipsverunreinigungen geachtet und Konzepte bzw. Technologien für die Ausschleusung des Gipses entwickelt werden

Nimmt die Vermischung von Bauschutt mit gipshaltigen Materialien in Zukunft stark zu, wie dies aufgrund der Modellrechnungen zu erwarten ist, bestehen bei einer Deponierung insbesondere für das Grundwasser erhebliche Risiken durch die Auslaugung von Schwermetallen, hervorgerufen durch das lokale Gipsüberangebot. Es muss daher beim Rückbau von Gebäuden stärker auf gipshaltige Materialien geachtet werden, auch wenn dies zunächst mit einer Kostenerhöhung durch den Einsatz neuer Technologien zur Separierung von Gipsputzen von anderen mineralischen Baustoffen verbunden ist. In diesem Zusammenhang könnten weitere Preissignale auf der Abfallseite, etwa in Form erhöhter Annahmgebühren seitens der Baustoffrecycler bzw. Baustoffdeponierer, sowie verschärfte Annahmegrenzwerte für Gips und Sulfate eine Lenkungswirkung sowohl auf einen kontrollierten Rückbau als auch in Richtung auf eine ökologische Produktgestaltung leisten.

These 9:

Ökonomische Steuerungsmöglichkeiten eignen sich für den Abbau von Naturgips und die unmittelbare Verwendung des technischen Gipses. Für die Beeinflussung der Produktherstellung sind jedoch differenzierte Maßnahmen erforderlich

Auf der Versorgungsseite sollte mit einem Stopp der Vergabe von Abbaulizenzen der Verbrauch von Naturgips gedrosselt werden, um so die begrenzten Reserven auch für zukünftige Verwendungen vorhalten zu können. Der Einsatz von Ressourcenverbrauchssteuern wird nicht befürwortet, da dies, um eine Lenkungswirkung hervorzurufen, eine unmittelbare Verdoppelung der bisherigen Marktpreise und damit einen erheblichen Markteingriff bedeuten würde. Ferner kann durch eine gezielte Anreizgestaltung die Verbringung des entstehenden künstlichen Gipses in künstliche Lagerstätten gefördert werden (Definition von Lagerstätten, Information an „Erzeuger“, Einlagerungsprämien). Auf der Produktseite wird eine Steuerung hin zu ökologisch verträglicheren Produkten mit Hilfe ökonomischer Instrumentarien wie Steuern oder direkter Prämien, die den Dispersionsgrad eines Produkts berücksichtigen, nicht befürwortet. Die hiervon ausgehenden Risiken, dass ex ante eine steuerliche Beeinflussung des Marktpreises für Aktivitäten vorgenommen wird, die weit in der Zukunft liegen (mangelnde Berücksichtigung des technischen Fortschritts), weiter eine ständige Bewertung des Dispersionsgrades zur Berücksichtigung neuer Produkte oder technischer Verbesserungen erfolgen muss, und ein Konsens über eine Zuordnung eines Produkts zu einem Dispersionsgrad herzustellen ist, sind nicht hinnehmbar. Zudem müsste sichergestellt werden, dass z.B. gezahlte Steuern später tatsächlich zum Recycling bzw. zur Deponierung und den daraus resultierenden Kosten herangezogen werden. Aus diesem Grunde sollten verstärkt informatorische und kooperative Maßnahmen wie eine intensive Akteurskooperation, eine erweiterte Ausbildung von Handwerkern, eine aktivere Information von Nutzern über ökologische Auswirkungen sowie Normungsaktivitäten herangezogen werden.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- Ahnert, R.; Krause, K.-H. (1991): Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960. Teil 1, Teil 2. 3. Auflage. Berlin, 1991
- Ahsen, M.v. (1990): Kohortenanalytische Prognosen im Rahmen einer strategischen Marktforschung. Dissertation, Universität Bremen, 1990
- Albrecht, R.; Paker, L.; Rehberg, S.; Reiner, Y. (1984): Umweltentlastung durch ökologische Bau- und Siedlungsweisen. Wiesbaden, 1984
- Alva, A.K. (1994): Possible utilization of flue-gas desulfurization gypsum and fly ash for citrus production: evaluation of crop growth response, in: Waste Management, Vol. 14, Heft 7/94, S. 621-627
- Ambrosini, L.; Riedi, M. (1994): Portlandcementwerk Olten. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1994
- Andrä, H.-P.; Schneider, R.; Henning, W.; Forster, C. (1995): Einsparung von Ressourcen im Hochbau: Reduzierung des Material- und Energieverbrauchs – Planungs- und Entscheidungsgrundlagen. Landsberg, 1995 (Reihe Umweltforschung in Baden-Württemberg)
- Andrä, H.-P.; Schneider, R.; Wickbold, T. (1994): Baustoff-Recycling: Arten, Menge und Qualitäten der im Hochbau eingesetzten Baustoffe; Lösungsansätze für einen Materialkreislauf. Landsberg, 1994 (Reihe Umweltforschung in Baden-Württemberg)
- Andreas-Grisebach, M. (1996): Mensch und/oder Natur. Grundzüge einer ökozentrischen Ethik, in: Hönig, J.; Schäffler, H. (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung. Transdisziplinäre Aspekte eines neuen Entwicklungskonzepts. Sternenfels, 1996, S. 19-30
- Angerer, G. (1993): Verwertung von Elektronikschrott: Stand der Technik, Forschungs- und Technologiebedarf. Berlin, 1993
- AWG (1990): Abfallwirtschaftsgesetz Österreich. Wien, BGBl. Nr. 325/1990
- Ayres, R.U. (1995): Thermodynamics and Process Analysis for Future Economic Scenarios, in: Environmental and Resource Economics, Jg. 6 (1995), S. 207-230
- Ayres, R.U. (1996): Statistical measures of unsustainability, in: Ecological Economics, Heft 16/96, S. 239-255
- Ayres, R.U.; Ayres, L.W. (1993): Use of materials balances to estimate aggregate waste generation and waste reduction potential in the U.S. Fontainebleau: INSEAD, 1993
- Baccini, P. (1991): Stoffwechselprozesse im Bauwesen, in: ETH Zürich: Energie- und Schadstoffbilanzen im Bauwesen. Beiträge zur Tagung vom 07.03.91 HBT-Solararchitektur, S. 11-18
- Baccini, P.; Bader, H.-P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung. Heidelberg, Berlin, Oxford, 1996
- Baccini, P.; Brunner, P.H. (1991): Metabolism of the Anthroposphere. Berlin, 1991
- Baccini, P.; Daxbeck, H.; Glenck, E.; Henseler, G. (1993): METAPOLIS. Güterumsatz und Stoffwechselprozesse in den Privathaushalten einer Stadt. Nationales Forschungsprogramm Stadt und Verkehr. Zürich, 1993

- Baden-Württemberg (1993): Abfallbilanz. Siedlungsabfälle in Baden-Württemberg. Stuttgart 1994
- Bader, H.-P.; Baccini, P. (1993): Monitoring and Control of Regional Material Fluxes. Dübendorf, 1993
- Baumann (1996): Rechtsgutachten zur Nichtanwendbarkeit des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes auf das Produkt REA-Gips. Angefertigt im Auftrag des Bundesverbandes der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V. Baumann Rechtsanwälte, Würzburg, 1996
- BDE Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. (1995): Kreislaufwirtschaft in der Praxis. Nr. 4: Baureststoffe. Köln, 1995
- Bechmann, G.; Frederichs, G. (1998): Umweltforschung zwischen Erkenntnis und Organisation, in: Daschkeit, A.; Schröder, W. (Hrsg.): Umweltforschung quergedacht. Perspektiven integrativer Umweltforschung und -lehre. Berlin, Heidelberg, 1998, S. 7-29
- Beckefeld, P.; Knüpfer, J. (1990): Untersuchung verfestigter Reststoffe aus der Rauchgasreinigung, in: Reimann, D.O.; Demmich, J.: Reststoffe aus der Rauchgasreinigung. Art – Behandlung – Verwertung – Entsorgung. Beihefte zu Müll und Abfall, Nr. 29. Berlin, 1990, S. 49-51
- Beckert, J., Einbrodt, H.J., Fischer, M. (1991): Vergleich von Naturgips und REA-Gips, in: VGB Kraftwerkstechnik, Jg. 71., Heft 1/91, S. 48-51
- Behrens, S. (1998): Stoffgemische als Erkenntnisobjekt der Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden, 1998
- Behrensmeier, R.; Bringezu, S. (1995): Zur Methodik der volkswirtschaftlichen Material-Intensitäts-Analyse: Ein quantitativer Vergleich des Umweltverbrauchs der bundesdeutschen Produktionssektoren. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 1995 (Reihe Wuppertal Papers Nr. 34)
- Behring, K.; Adler, U.; Gluch, E.; Karl, H.-D.; Niklas, J.; Rammner, P.; Seufert, W.; Söffner, F. (1989): Baubedarf – Perspektiven bis 2000. ifo-Institut für Wirtschaftsforschung. München, 1989 (Reihe ifo-Studien zur Bauwirtschaft, Heft 14)
- Bennewitz, J. (1996): Ökodynamische Anwendung der Hauptsätze der Thermodynamik. Eine Theorie der Ökonomie. Heiligenhaus, 1996
- Berg, R. (1994): Die Aufbereitung von Phosphorsäureabfallgipsen für die Weiterverarbeitung zu Baustoffen, in: Zement-Kalk-Gips, 47. Jg. Heft 12/94, S. 690-696
- Bertsch, K.; Meinhardt, S. (1990): Schaumgips - eine Möglichkeit zur Entsorgung von REA-Gips. FHG-Berichte 3/90, S. 31-35
- Betz, M.; Keissig, J. (1996): Ganzheitliche Bilanzierung von Gebäuden, in: Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung – Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Berlin, Heidelberg, 1996, S. 467-490
- BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1995): Mineralische Rohstoffe. Bausteine für die Wirtschaft. Hannover, 1995
- BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1998): Rohstoffsicherungsbericht Niedersachsen 1998

- Bilitewski, B. (1992): Aufbereitung von Baurestmassen, in: Thomé-Kozmiensky, K.-H.: Materialrecycling durch Abfallaufbereitung, Berlin 1992, S. 485-502
- Bilitewski, B.; Gewiese, A.; Härdtle, G.; Marek, K. (1995): Vermeidung und Verwertung von Reststoffen in der Bauwirtschaft. Beihefte zu Müll und Abfall, Nr. 30. 3., Neubearb. und erw. Auflage. Berlin, 1995
- Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K. (1994): Abfallwirtschaft: eine Einführung. 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York 1994
- Binswanger, H.C. (1991): Geld und Natur: Das wirtschaftliche Wachstum im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie. Stuttgart, Wien, 1991
- Binswanger, H.C.; Minsch, J. (1992): Theoretische Grundlagen der Umwelt- und Ressourcenökonomie – Traditionelle und alternative Ansätze, in: Hauff, M.; Schmidt, U. (Hrsg.): Ökonomie und Ökologie. Stuttgart, 1992, S.41-66
- Binswanger, M. (1992): Information und Entropie. Frankfurt, 1992
- Binz, A. (1994): Baustoffökologie. Versuch einer Standortbestimmung, in: Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 47/94, S. 983-986
- Birkhofer, H.; Schott, H. (1996): Die Entwicklung umweltgerechter Produkte – eine Herausforderung für die Konstruktionswissenschaft, in: Konstruktion, Heft 48/96, S. 386-396
- Bredenbals, B.; Willkomm, W. (1997): Ausschreibungshilfen für recyclinggerechte Wohnbauten, Ausschreibungshilfen für abfallarmes und recyclinggerechtes Erstellen von Wohnbauten. Projekt im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Stuttgart, 1997
- Breer, J.; Dechow, O.; Jochimsen, J. u.a. (1992): Computerschrott-Recycling – Stand und Entwicklungsmöglichkeiten. Berlin, 1992 (Reihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 48)
- Breng, R.; Vulpe, B.; Konzak, K.; Franke, A.: Lipidsenkende Wirkung einer Trinkkur mit stark sulfathaltigem Mineralwasser, in: Ärztliche Forschung – Zeitschrift über die Forschungsergebnisse der gesamten Medizin, Jg. 41, Heft 1/94, S. 1-13
- Brenner, C.; Weibel, Th. (1995): Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1995
- Bresch, C.M. (1995): Trockenbauprinzip. Vergleich Gipsfaserplatte – Gipskartonplatte, in: Bauhandwerk, Jg. 17, Heft 7/8, S. 37-40
- Bringezu, S. (1996): Von der Abfallwirtschaft zur Stoffwirtschaft. Österreichische Abfallwirtschaftstagung Klagenfurt, 1996, S. 199-224 (Schriftenreihe des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Heft 103)
- Brunner, P.H. (1992): Das Schließen von Stoffkreisläufen als neue unternehmerische und gesellschaftliche Herausforderung, in: Industrie und Umweltschutz, 44. Jg., Heft 3/92, S. 57-66
- Brunner, P.H.; Stämpfli, D. (1993): Material balance of a construction waste sorting plant, in: Waste Management & Research, Heft 11/93, S. 27-48

- Bruvoll, A.; Ibenholt, K. (1997): Future waste generation. Forecasts on the basis of a macro-economic model, in: Resources, Conservation and Recycling, Heft 19/97, S. 137-149
- Buhé, C.; Achard, G.; Le Téo, J.F.; Chevalier, J.L. (1997) : Integration of the recycling processes to the life cycle analysis of construction products, in: Resources, Conservation and Recycling, Heft 20/97, S. 227-243
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung – BBR (1998): Prognose der mittel- und langfristigen Nachfrage nach mineralischen Baurohstoffen. Bearbeitet von Fleckenstein, K.; Hochstrate, K.; Knoll, A.; Billek, B. Bonn, 1998 (Reihe Forschungsberichte des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Heft 85)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1998): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland. Entwurf eines umweltpolitischen Schwerpunktprogramms. Bonn, 1998
- Bundesverband der Deutschen Kies- und Sandindustrie e.V. (1997): Geschäftsbericht Kies und Sand 1996
- Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V. (1995): Gips-Datenbuch. 1. Auflage. Darmstadt, 1995
- Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V. (1997): Wohin mit dem Gipsabfall? Merkblatt zur Entsorgung von Gipsabfällen. Darmstadt, 1997
- Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V. (1997): REA-Gips. Düsseldorf, 1997 (Reihe Produktinformationen, Band 3)
- BUWAL (1986): Leitbild für die Schweizerische Abfallwirtschaft. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 1986 (Schriftenreihe Umwelt Nr. 51)
- BUWAL (1995): Bauprodukte und Zusatzstoffe in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 1995 (Schriftenreihe Umwelt Nr. 245)
- Clarke, L.B. (1993): Management of FGD residues. IEA Coal Research London, 1993
- Corino, C. (1995): Ökobilanzen: Entwurf und Beurteilung einer allgemeinen Regelung. Düsseldorf, 1995 (Reihe Umweltrechtliche Studien, Band 19)
- Davis, L.L. (1993): Minerals Review: Gypsum, in: American Ceramic Society Bulletin, Heft 6/93, S. 100
- Daxbeck, H.; Merl, A.; Obernosterer, R.; Brunner, P.H. (1994): Die Stoffflussanalyse als Instrument für eine nachhaltige urbane Entwicklung. Studie zur Wiener Internationalen Zukunftskonferenz – WIZK 94. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft, 1994
- de Man, R. (1994): Erfassung von Stoffströmen aus naturwissenschaftlicher Sicht: Akteure, Entscheidungen und Informationen im Stoffstrommanagement. Studie im Auftrag der Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages. Leiden 1994
- de Man, R. (1994): Erfassung von Stoffströmen aus naturwissenschaftlicher Sicht: Akteure, Entscheidungen und Informationen im Stoffstrommanagement. Studie im Auftrag der Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages. Leiden, 1994

- de Man, R.; Ankele, K.; Claus, F.; Fichter, K.; Völkle, E. (1997). Aufgaben des betrieblichen und betriebsübergreifenden Stoffstrommanagements. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin, 1997
- Deppe, H.-J. (1993): Probleme bei der Verwertung und Entsorgung kontaminierter Althölzer, in: Bilitewski, B.: Recycling von Baureststoffen, Berlin, 1993, S. 215-230
- Di Fabio, U. (1997): Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz: Gesetzlicher Einstieg in die staatliche Produktionssteuerung? in: Thews, G.; Servatius, C.: Stoffkreisläufe in natürlichen und industriellen Prozessen. Stuttgart, Jena, 1997, S. 93-102
- Dieren, W. van (1994): Die neue Feudalität und die Umweltkrise, in: Ökologische Briefe, Nr. 17, 27.04.94, S. 11-13
- DIN (1986): DIN 1168: Baugipse – Begriff, Sorten und Verwendung, Lieferung und Kennzeichnung. Berlin, 1986
- DIN (1989): DIN 18 180: Gipskartonplatten – Arten, Anforderungen, Prüfung. Berlin, 1989
- Ebel, W.; Feister, W.; Kahlert, C.; Hildebrandt, O.; Born, R.; Großklos, M.; Siepe, B. (1996): Stoffströme und Kosten im Bereich Bauen und Wohnen. Teilbericht Energiebedarf und Stoffinventare von Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1996
- Ebel, W.; Kahlert, C. (1996): Stoffströme und Kosten im Bereich Bauen und Wohnen. Teilbericht Methodische Grundlagen des Gebäudemodells. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1996
- Eckerle, K.; Hoger, P.; Masuhr, K.P.; Czipka, T.; Schmid, G. (1995): Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa – Perspektiven bis zum Jahr 2020. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft. Prognos AG, Basel, 1995
- Eibl, J.; Walther, H.-J. (1995): Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baureststoffe für Beton. Kapitel 2: Umweltgerechter Rückbau. DafStB-Sachstandsbericht. Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 1995
- Einbrodt, H.J. (1995): Toxikologische Beurteilung von Bauschutt aus Baustoffen auf Gipsbasis im Hinblick auf die Deponierbarkeit. Gutachterliche Stellungnahme im Auftrag des Bundesverbands der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V. Darmstadt, 1995
- Ellison, W.; Makansi, J. (1990): World by-product gypsum utilisation, in: Industrial Minerals, Vol. 348, Heft 3/90, S. 33-43
- Engert J. et al.: Innovative Qualitätsbaustoffe aus REA-Gips - großtechnische Betriebserfahrungen und Vertriebskonzeption. In: VGB-Konferenz Kraftwerk und Umwelt 1995, VGB-TB 313, S. 166-169
- Engert, H.-J.; Etscheit, T.; Kirchen, G.; Osthoff, W. (1995): Innovative Qualitätsbaustoffe aus REA-Gips – Großtechnische Betriebserfahrungen und Vertriebskonzeptionen, in: VGB-Konferenz Kraftwerk und Umwelt 1995, S. 166-169 (VGB-TB 313)
- Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt: Ziele und Bedingungen einer Nachhaltigen Entwicklung“ des Deutschen Bundestages (1998): The Concept of Sustainability – From Vision to Reality. Bonn, 1998

- Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (1993): Verantwortung für die Zukunft - Wege zum nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Zwischenbericht Bonn, 1993
- Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (1994): Die Industriegesellschaft gestalten - Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Drucksache 12/8260. Bonn, 1994
- Ertle, J. (1995): Realisierung einer Kreislaufwirtschaft – Baureststoffe, in: Rinschede, A.; Wehking, K.-H.: Entsorgungslogistik III. Kreislaufwirtschaft. Berlin, 1995, S. 161-184
- Ewers, H.-J.; Brenck, A. (1994): Divergenz zwischen Stoff- und Wertströmen – Ökonomische Lösungen des Problems der Gefährlichkeit von Stoffen, in: Umweltverträgliches Stoffstrommanagement – Konzepte, Instrumente, Bewertung. Studie im Auftrag der Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages. Bonn, 1994
- Eyerer, P. (Hrsg.): Ganzheitliche Bilanzierung: Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Berlin, Heidelberg 1996
- Faber, M.; Niemes, H.; Stephan, G. (1995): Entropy, Environment and Resources. An Essay in Physico-Economics. Berlin, Heidelberg, 1987, 1995
- Faber, M.; Proops, J.L.R. (1996): Economic Action and the Environment, in: Driver, T.S.; Chapman, G.P. (Eds.): Time-scales and Environmental Change. London, New York, 1996, S. 196-217
- Faber, M.; Proops, J.L.R.; Baumgärtner, S. (1996): Every Production is Joint Production – a Thermodynamic Analysis. Universität Heidelberg, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, 1996 (Reihe Diskussionsschriften, No. 234)
- Faber, M.; Stephan, G.; Michaelis, P. (1988): Umdenken in der Abfallwirtschaft. Berlin, Heidelberg, 1988
- Fehringer, R.; Brunner, P.H. (1996): Kunststoffflüsse und die Möglichkeiten der Verwertung von Kunststoffen in Österreich. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft, 1996
- Feldhaus, S. (1998): Ethische Grundlagen eines verantwortlichen Umgangs mit Stoffströmen, in: Friege, H.; Engelhardt, C.; Henseling, K.O. (Hrsg.): Das Management von Stoffströmen. Geteilte Verantwortung – Nutzen für alle. Berlin, Heidelberg, 1998, S. 172-183
- Fleckenstein, K. (1986): Vergleichende Untersuchung der regionalen Auswirkungen eines veränderten Rohstoffabbaus. Studie für den Abbau von Kies und Naturstein in Baden-Württemberg. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1986
- Fleischer, G.; Bargfrede, M.; Schiller, U. (1995): Untersuchung des Standes der Technik zur Vermeidung und Verwertung von Abfallsäuren und Gipsen mit produktionsspezifischen Beimengungen. Band I: Säuren aus der chemischen Industrie. Berlin, 1995 (Umweltbundesamt: UBA-Texte 8/95)
- Förstner, U. (1995): Umweltschutztechnik: eine Einführung. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, 1995

- Freise, H. (1996): Kreislaufwirtschaftsgesetz und Bauwirtschaft, in: Entsorgungspraxis, Heft 5/96, S. 94-100
- Fritsche, U.; Rausch, L.; Buchert, M.; Hochfeld, C.; Jenseit, W.; Matthes, F.; Stahl, H.; Witt, J. (1997): GEMIS – Gesamtemissionsmodell integrierter Systeme. Version 3.0
- Gallenkemper, B.; Gellenbeck, K. (1994): Minimierung von Abfällen auf der Baustelle, in: Schriftenreihe der Lehrstühle für Abfallwirtschaft und Siedlungswasserwirtschaft. 2. Weimarer Fachtagung über Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft, 1994, S. 11-1 – 11-13
- Gebhardt, W. (1997): Abfallrechtliche Neuerungen im Bereich der Bauabfälle, in: Baustoff-Recycling und Deponietechnik, Jg. 13, Heft 4/97, S. 4-8
- Georgescu-Roegen, N. (1971): The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge, London, 1971
- Georgescu-Roegen, N. (1981): Energy, Matter, and Economic Valuation: Where Do We Stand?, in: Daly, H.E.; Umana, A.F. (Hrsg.): Energie, Economics, and the Environment. Boulder, 1981, S. 43-79
- Gewiese, A. (1998): Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Berlin, 1998
- Glenck, E.; Lahner, T.; Arendt, M.; Brunner, P.H. (1997): Baurestmassen in Oberösterreich: Stoffbilanzen der Bauwirtschaft. Vorstudie im Auftrag der oberösterreichischen Landesregierung. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft, 1997
- Glenck, E.; Lahner, T.; Brunner, P.H. (1996): Güterbilanz des Bauwesens - Baurestmassen in Oberösterreich. Endbericht BRIO. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft, 1996
- Görg, H. (1996): Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Darmstadt, 1997 (Schriftenreihe WAR Nr. 98)
- Görg, H. (1997): Konsequenzen aus dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz und Lösungsmöglichkeiten für die bauausführende Wirtschaft, in: Kreislaufgerechtes Bauen im Massivbau. Darmstadt, 1997, S. II-1 – II-20 (Darmstädter Massivbau-Seminar Band 18)
- Görg, H., Jager, J. (1993): Kreislaufwirtschaft Bau, in: 32. Darmstädter Seminar Abfalltechnik „Kreislaufwirtschaft Bau – Stand und Perspektiven beim Recycling von Baurestmassen“. Darmstadt, 1993, S. 3-20 (Schriftenreihe WAR Nr. 67)
- Görg, H.; Müller, U. (1996): Zeichen aus der Wand. Mit einem neuen Prognosemodell können aus Gebäudedaten die zukünftigen Mengen an Baureststoffen geschätzt werden, in: MüllMagazin, Heft 4/96, S. 55-59
- Gort, H. (1995): Strukturen einer Ökobilanz unter besonderer Berücksichtigung der Bewertungsmethoden und der Anwendung bei Baustoffen. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 1995
- Grießhammer, R.; Buchert, M. (1996): Nachhaltige Entwicklung und Stoffstrommanagement am Beispiel Bau. Freiburg, 1996 (Reihe Öko-Institut e.V. Werkstattreihe Nr. 96)

- Grießhammer, R.; Eberle, U.; Gensch, C.-O.; Strubel, V. (1995): Ökologische Produktentwicklung und Produkteinführung mit Ökobilanzen und Akteurskooperationen. Freiburg, 1995
- Guinée, J.; Heijungs, R. (1993): A proposal for the classification of toxic substances within the framework of life cycle assessment of products, in: Chemosphere, Vol. 26, Heft 10/93, S. 1925-1944
- Günnewig, D.; Riedl, U. (1998): Entscheidungsgrundlagen für die weitere Nutzung der Gipskarstlandschaft Südharz / Kyffhäuser unter besonderer Berücksichtigung des Bodenschutzes. Berlin, 1998 (Umweltbundesamt: UBA-Texte 39/98)
- Gutscher, H. (1993): Die sozialpsychologischen Barrieren bei der Abfallvermeidung. Vortrag anlässlich der Tagung „Öko-Effizienz in der Praxis. Abfall vermeiden – Energie sparen“. Basel, 19.03.93
- Haber, W. (1998): Nachhaltigkeit als Leitbild einer natur- und sozialwissenschaftlichen Umweltforschung, in: Daschkeit, A.; Schröder, W. (Hrsg.): Umweltforschung quergedacht. Perspektiven integrativer Umweltforschung und -lehre. Berlin, Heidelberg, 1998, S. 127-146
- Haber, W.; Halbritter, G. (1993): Vermeidung und Verwertung von Abfällen – Zur Konzeption des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen im Sondergutachten „Abfallwirtschaft“, in: Sutter, H.; Held, M.: Stoffökologische Perspektiven der Abfallwirtschaft, Berlin 1993, S. 24-41 (Reihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 57)
- Halfmann, M. (1996): Industrielles Reduktionsmanagement: Planungsaufgaben bei der Bewältigung von Produktionsrückständen. Wiesbaden, 1996
- Hamm, H. (1991): Die Bewältigung des REA-Gipsproblems in der Bundesrepublik Deutschland aus technischer, wirtschaftlicher und marktorientierter Sicht, in: Zement-Kalk-Gips, 44. Jg. Heft 12/91, S. 593-604
- Hamm, H. (1994): Die Verwertung von REA-Gips – eine Aufgabe der europäischen Gipsindustrie, in: Zement-Kalk-Gips, 47. Jg. Heft 8/94, S. 443-451
- Händl, R. (1994): Baustoffrecycling. Einflussfaktoren auf die Unternehmen, deren Anpassungshandlung und Recyclingtätigkeit. Dissertation, LMU München, 1994
- Haneklaus, S.; Paulsen, H.M.; Schnug, E. (1996): Feldversuche zum Einsatz von Rauchgasentschwefelungsprodukten als Schwefeldünger, in: VGFB Kraftwerkstechnik, Jg. 76, Heft 8/96, S. 676-680
- Hansen, U. (1994): Redistribution und Demontage in der industriellen Kreislaufwirtschaft, in: Umweltwirtschaftsforum, Jg. 2, Heft 4, S. 39-46
- Hansen, U.; Sommer, M. (1992): Informations- und Dispositionssysteme, in: Rinschede, A.; Wehking, K.-H.: Entsorgungslogistik II. Entwicklung und Bewertung neuer Konzepte und Technologien. Berlin 1992, S. 127-137
- Harborth, H.J. (1991): Dauerhafte Entwicklung statt globaler Umweltzerstörung. Berlin, 1991
- Härig, S.; Günther, K.; Klausen, D. (1996): Technologie der Baustoffe. 13. Auflage. Heidelberg, 1996

- Hartel, M. (1994): Bewertung der Demontageeignung komplexer Produktstrukturen in der Entwurfsphase als Element des Life-Cycle-Design, in: Umweltwirtschaftsforum, Heft 5/94, S. 40-48
- Hartel, M. (1997): Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten. Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung des Lebenszyklus in der Produktentwicklung. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1997
- Hartung, J. (1998): Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 11. Auflage. München, 1998
- Hassler, U.; Kohler, N. (1998): Umbau – die Zukunft des Bestand, in: Baumeister, Jg. 95, Heft 4/98, S. 34-41
- Haug, N. (1994): Substitution von Naturgips durch Gips aus Abgasentschwefelungsanlagen, in: Staub - Reinhaltung der Luft, Jg. 54, Heft 5/94, S. 309-312
- Haug, N.; Remus, R. (1993): Reststoffvermeidung und –verwertung durch das immissions-schutzrechtliche Vermeidungs- und Verwertungsgebot, in: Staub – Reinhaltung der Luft, Jg. 53, Heft 2/93, S. 93-99
- Heeg, F.-J; Veismann, M.; Schnatmeyer, M. (1994): Recycling-Management, in: Umweltwirtschaftsforum, Jg. 2, Heft 4, S. 23-30
- Heijungs, R. (1995): Harmonization of Methods for Impact Assessment, in: Environmental Science and Pollution Research, Jg.2, Heft 4/95, S. 217-224
- Heins, B. (1997): Die Rolle des Staates für eine nachhaltige Entwicklung der Industriegesellschaft. Berlin, 1997
- Helm, M. (1993): Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum Baustoffrecycling, in: Bilitewski, B.: Recycling von Baureststoffen, Berlin, 1993, S. 315-320
- Hennecke, H.-P. (1993): Die Steine- und Erden-Industrie in Europa unter besonderer Berücksichtigung der Kalkindustrie, in: Zement-Kalk-Gips, Jg. 46, Heft 1/93, S. 1-8
- Henseling, K.O. (1998): Grundlagen des Managements von Stoffströmen, in: Friege, H.; Engelhardt, C.; Henseling, K.O. (Hrsg.): Das Management von Stoffströmen. Geteilte Verantwortung – Nutzen für alle. Berlin, Heidelberg, 1998, S. 16-33
- Herrmann, R. (1977): Baurestmassen im ökologisch orientierten Planungs-, Bau- und Nutzungsprozess. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1977
- Hettenbach, P. (1991): Anfall und Wiederverwendbarkeit von abgängigen mineralischen Baustoffen und Erdaushub. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1991
- Hiersche, E.U.; Wörner, T. (1990): Alternative Baustoffe im Bauwesen. Berlin, 1990
- Hillemeier, B. (1997): Innovationen am Baustoffmarkt, neue Baustoffe sichern das Bauen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Jg. 63, Heft 3/97, S. 74-82
- HLT Gesellschaft für Forschung Planung Entwicklung mbH (1997): Rohstoffsicherungskonzeption für Hessen. Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Wiesbaden, 1997 (HLT-Report Nr. 524)

- Hoffmann, J.; Wissmeier, G. (1996): Soziale Implikationen der Kreislaufwirtschaft, in: Neue Technologien für die Kreislaufwirtschaft. Symposium Karlsruhe 21./22.05.96, herausgegeben vom Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), S. 11-1 – 11-12
- Holzhey, G. (1997): Geogener Sulfat-Gehalt im Bereich der Hauptgrundwasserführung. Karte 1:200 000. Thüringer Landesanstalt für Geologie, Erfurt, 1997
- Hönig, J.; Schäffler, H. (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung. Transdisziplinäre Aspekte eines neuen Entwicklungskonzepts. Sternenfels, 1996
- Horn, R. (1995): Die strategische Bestimmung von Zielgruppen im Rahmen der Positionierung mit Hilfe der Kohortenanalyse: dargestellt am Beispiel des Pharmamarkts. Dissertation, Universität Köln, 1995
- Hummel, H.-U. (1997): Recycling von Gipsplatten, in: Kreislaufgerechtes Bauen im Massivbau. Darmstadt, 1997, S. XI-1 – XI-8 (Darmstädter Massivbau-Seminar Band 18)
- ITAS/ifib (1998): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Studie im Auftrag der Enquête-Kommission des Deutschen Bundestags „Schutz des Menschen und der Umwelt“. Bearbeitet von Kohler, N.; Paschen, H. et al.
- IWU Institut Wohnen und Umwelt (1996): Stoffströme und Kosten im Bereich des Bauen und Wohnen. Zwischenbericht. Darmstadt, 1996
- Jandel, A.S. (1997): Renaissance für alte Recyclingtechnik, in: VDI nachrichten, Nr.32/97 vom 08.08.97, S. 14
- Janssen, I.; Fellingner, R. (1994): Ökobilanz Citronensäuregips, in: Ecoinforma, Band 7, S. 81-93
- Jorde, T.; Konrad, W. (1994): Aspekte einer ökologisch orientierten Produktgestaltung von Elektro- und Elektronikgeräten mit besonderer Bedachtnahme auf ihre Verwertung und Entsorgung. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie. Wien, 1994
- Jorden, W.; Weege, R. (1979): Recycling beginnt in der Konstruktion, in: Konstruktion, Heft 10/79, S. 381-387
- Jörissen, J.; Kopfmüller, J., Brandl, V., Paetau, M. (1999): Ein integratives Konzept nachhaltiger Entwicklung. Forschungszentrum Karlsruhe, 1999 (Reihe Wissenschaftliche Berichte, Nr. FZKA 6393)
- Jörissen, J.; Socher, M.; Meyer, R. (1993): Vorsorgestrategien zum Grundwasserschutz für den Bausektor. Teilbericht des TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Bonn, 1993 (TAB-Arbeitsbericht Nr. 17)
- Jünemann, R. (1996): Intelligentes Stoffstrommanagement, in: Neue Technologien für die Kreislaufwirtschaft. Symposium Karlsruhe 21./22.05.96, herausgegeben vom Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), S. 8-1 – 8-26
- Jüttner, H. (1993): Handhabbarkeit und Lenkungswirkung von Abgabekonzepten für Rohstoffe, in: Institut für Ökologisches Recycling: Neue Wege ohne Abfall – Tendenzen, Fakten, Strategien. Dokumentation / Fachkongress zur „Ökologischen Abfallwirtschaft III, 06.10.-08.10.93“. Berlin, 1993, S. 137-142

- Kahl, D. (1993): Immobilisation schadstoffhaltiger Materialien, in: Internationale Fachtagung Innsbruck-Igls, 1993, S. 93-101
- Kahl, D.; Pfeiffer, J. (1995): Optimierung der Rauchgasentschwefelung für die Qualität der Reststoffe beim Einsatz von Braunkohle mit hohem Schwefelgehalt an einer Pilotanlage, in: VGB-Konferenz Kraftwerk und Umwelt 1995, S. 125-128 (VGB-TB 313)
- Kersting, A. (1998): Entsorgungswege unter dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – und was dies für Baumischabfälle heißt! In: Baustoff-Recycling und Deponietechnik, Jg. 14, Heft 1/98, S. 16-21
- Kirchgeorg, M. (1997): Ziele und Strategien der Gestaltung von Stoffkreisläufen für langlebige Gebrauchsgüter, in: VDI (Hrsg.): Kreislaufwirtschaftskonzepte. Wirtschaftsforum, veranstaltet von der FET & WW gemeinsam mit der IHK Essen, 07.03.96. Düsseldorf, 1997, S. 31-54 (Fortschrittsberichte VDI Reihe 15 Nr. 180)
- Kleiber, W. (1991): Technische Lebensdauer von baulichen Anlagen und Bauteilen, in: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.): Sammlung amtlicher Texte zur Wertermittlung von Grundstücken in den alten und neuen Bundesländern (WertR91). 3. Auflage. Bundesanzeiger, 1991
- Klemmer, P.; Hecht, D.; Hillebrand, B.; Karl, H.; Löbbe, K. u.a. (1994): Grundlagen eines mittelfristigen umweltpolitischen Aktionsplans. Essen, 1994 (Reihe Untersuchungen des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung, Heft 10)
- Klett, W; Enders, R. (1996): Der Bauherr bleibt Besitzer – Verantwortungsbereich des Abfalls juristisch betrachtet, in: Entsorga Magazin Entsorgungswirtschaft, Heft 3/96, S. 28-34
- Kloft, H. (1997): Baustoffliche Bewertung von Gebäuden, in: Kreislaufgerechtes Bauen im Massivbau. Darmstadt, 1997, S. IX-1 – IX-13 (Darmstädter Massivbau-Seminar Band 18)
- Kloft, H. (1998): Untersuchungen zu Material- und Energieströmen im Wohnungsbau. Dissertation, TH Darmstadt, 1998
- Klöpfer, M.; Delbrück, K. (1993): Rechtliche Möglichkeiten des vorsorgenden Grundwasserschutzes im Baubereich – Bestandsaufnahme und Perspektiven. Rechtsgutachten im Auftrag des TAB 1993
- Knüppel, H. (1989): Umweltpolitische Instrumente. Analyse der Bewertungskriterien und Aspekte einer Bewertung. Baden-Baden, 1989
- Koch, H.-J. (1996): Steinkohlenflugasche, Kesselsand, Schmelzkammergranulat und Gips – anerkannte Bauprodukte, in: VGB Kraftwerkstechnik, Jg. 76, Heft 2/96, S. 158-164
- Kohler, G. (Hrsg) (1997): Recyclingpraxis Baustoffe. 3. Auflage. Köln, 1997
- Kohler, G.; Kurkowski, H. (1998): Aktuelle technische Entwicklungen der Bauschuttaufbereitung mit dem Ziel der höherwertigen Verwertung, in: Abfallwirtschaftsjournal, Heft 5/98, S. 32-36
- Kohler, N. (1991): Gesamtenergetische Bewertungen von Bauteilen und Gebäuden, in: ETH Zürich: Energie- und Schadstoffbilanzen im Bauwesen. Beiträge zur Tagung vom 07.03.91 HBT-Solararchitektur, S. 55-69

- Kohler, N.; Lützkendorf, T.; Holliger, M. (1992): Ökobilanzen und Elementkostengliederung. Die Anwendung der Elementkostengliederung bei der Erstellung von Energie- und Stoffbilanzen für Gebäude, in: Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 9/92, S. 170-172
- Köller, H. von (1996): Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz: Textausgabe mit Erläuterungen. Berlin, 1996 (Zweite überarbeitete und erweiterte Auflage)
- Korff, W.; Feldhaus, S. (1996): Das Problem der Endlagerung radioaktiven Abfalls. Ethische Bewertung unter dem Aspekt der Güter- und Übelabwägung, in: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung, Jg. 9, Heft 1/96, S. 31-40
- Kreibich, R. (1994): Ökologische Produktgestaltung und Kreislaufwirtschaft, in: Umweltwirtschaftsforum, Heft 5/94, S. 13-22
- Kreibich, R. (1997): Nachhaltige Entwicklung – Leitbild für Wirtschaft und Gesellschaft, in: Umweltwirtschaftsforum, Jg. 5, Heft 2/97, S. 6-13
- Kruse, H.; Donslund, B. Ipsen, K.H.; Krom, T.D. (1995): Landfill Disposal of Coal Combustion By-Products: Future Strategies, in: VGB-Konferenz Kraftwerk und Umwelt 1995, S. 132-135 (VGB-TB 313)
- KrW/AbfG (1994): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz). BGBl. I, S. 2705, 1994
- Kulke, H. (1997): Der Harz (Norddeutschland): Geologisch-lagerstättenkundlicher Überblick, historische Baumaterialien (Natursteine, Gipsmörtel, Schlackensteine, Blei), in: Mitt. Österr. Miner. Ges., Nr. 142/97, S. 43-84
- Kümmerer, K.; Bunke, D.; Führ, M.; Gebers, B.; Gensch, C.O.; Lehn, H. (1992): Grundwasserschutz und Wasserversorgung: Bauindustrie und Baugewerbe. Gutachten im Auftrag des TAB 1992, Öko-Institut Freiburg, Darmstadt
- Küpper, W. (1974): Planung der Instandhaltung. Wiesbaden, 1974
- Kurkowski, H. (1997): Kreislaufgerechter Rückbau und Baustellenentsorgung, in: Kohler, G. (Hrsg.): Recyclingpraxis Baustoffe. 3. Auflage. Köln, 1997, S. 337-356
- Kutsovskaya, M.L.; Hepworth, M.T., McGaa, J.R. (1996): Recovery of Lime, Sulfur, and Iron from Gypsum and Pyrite Wastes, in: Ind. Eng. Chem. Res, Heft 35/96, S. 1736-1746
- KWTB Kreislaufwirtschaftsträger Bau (1995): Entsorgung von Baurestmassen, Grundsatzpapier. Bonn, 1995
- Kytzia, S. (1995): Die Ökobilanz als Bestandteil des betrieblichen Informationsmanagements. Dissertation, Hochschule St. Gallen, 1995
- Lahner, T. (1994): Steine und Erden. Für die ökologische Bewertung des Bauwesens ist eine Stoff- und Güterbilanz notwendig, in: MüllMagazin, Heft 1/94, S. 9-10
- Lahner, T.; Brunner, P.H. (1994): Buildings as reservoirs of materials – their reuse and implications for future construction design, in: Lauritzen, E.K. (ed.): Demolition and Reuse of Concrete. London, 1994, S. 479-485

- Lampert, C.; Morf, L.; Obernosterer, R.; Rechberger, H.; Reiner, I.; Brunner, P.H. (1996): Der anthropogene Stoffhaushalt der Stadt Wien - Projekt PILOT. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft, 1996
- Landeck, H. (1994): Konstruktion eines entsorgungsfreundlichen Farbfernsehgerätes der Loewe Opta GmbH, in: Umweltwirtschaftsforum, Heft 5/94, S. 64-67
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA (1995): Anforderung an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen, Technische Regeln Stand 01.03.1994 – Ergänzung vom 05.09.1995
- Langer, A.; Stein, V. (1997): Untersuchungen zur Lagerfähigkeit von REA-Gips in freiliegenden Vorratsdepots, in: Zeitschrift für angewandte Geologie, Jg. 43, Heft 1/97, S. 13-18
- Lehmann, M.; Sühlo, A.; Wätzold, F. (1993): Zur Bewertung von Umweltsteuern bei unbekannten ökologischen Wirkungsketten, in: Institut für Ökologisches Recycling: Neue Wege ohne Abfall – Tendenzen, Fakten, Strategien. Dokumentation / Fachkongress zur „Ökologischen Abfallwirtschaft III, 06.10.-08.10.93“. Berlin, 1993, S. 129-136
- Leyshon, D. (1996): The gypsum dilemma. In: Phosphorus & potassium. Heft Nr. 202, März/April 1996
- Liesegang, D.G. (1993): Reduktionswirtschaft als Komplement zur Produktionswirtschaft – eine globale Notwendigkeit, in: Haller, M. et al. (Hrsg.): Globalisierung der Wirtschaft – Einwirkungen auf die Betriebswirtschaftslehre. Bern, 1993, S. 383-395
- Liesegang, D.G. (1994): Zur Einführung, in: Umweltwirtschaftsforum, Jg. 2, Heft 4, S. 6-7
- Liesegang, D.G. (1996): Reduktions- und Produktionswirtschaft. Partner in einer umweltbewussten, auf Nachhaltigkeit bedachten Volkswirtschaft, in: Umweltwirtschaftsforum, Jg. 4, Heft 4/96, S. 3-5
- Link, G; Feher, L. (1999): Mikrowellen zum Abtrag von Beschichtungen im Bauwesen. Projektskizze zum BMBF-Projekt „Baustoffkreislauf im Massivbau“, Karlsruhe, 1999
- Löffler, M.; Schmuck, A. (1985): Untersuchung des Planungsfalles „Straßenerhaltung für das überörtliche Straßennetz in Hessen“. Schlussbericht zum Untersuchungsauftrag des Hessischen Landesamtes für Straßenbau, Wiesbaden, 1985
- Looß, A.; Katz, C. (1995): Abfallvermeidung. Strategien, Instrumente und Bewertungskriterien. Berlin, 1995 (Reihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 81)
- Lünser, H. (1996): Ganzheitliche Bilanzierung von Ingenieurbauwerken, in: Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung – Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Berlin, Heidelberg, 1996, S. 438-466
- Lützkendorf, T. (1991): Systemgrenzen für Energie- und Schadstoffbilanzen, in: ETH Zürich: Energie- und Schadstoffbilanzen im Bauwesen. Beiträge zur Tagung vom 07.03.91 HBT-Solararchitektur, S. 39-54
- Lützkendorf, T.; Kohler, N.; Holliger, M. (1992): Methodische Grundlagen für Energie- und Stoffflussanalysen – Handbuch. Bundesamt für Energiewirtschaft Bern, 1992
- MacQueen, D. (1993): Gypsum: Record Shipments Expected Next Year, in: Rock products, Heft 12/93, S. 48

- Mallon, T. (1998a): REA-Gips – Technische und wirtschaftliche Aspekte eines Sekundärrohstoffs, Teil 1, in: Zement-Kalk-Gips, 51. Jg., Heft 4/98, S. 220-228
- Mallon, T. (1998b): REA-Gips – Technische und wirtschaftliche Aspekte eines Sekundärrohstoffs, Teil 2, in: Zement-Kalk-Gips, 51. Jg., Heft 5/98, S. 272-278
- Mason, B.; Moore, C.B. (1985): Grundzüge der Geochemie. Stuttgart, 1985
- Mayer, L. (1993): Vermeidung und Verwertung von Baureststoffen, in: Sutter, H.; Held, M.: Stoffökologische Perspektiven der Abfallwirtschaft, Berlin 1993, S. 101-117 (Reihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 57)
- Meckel, H.; Klockow, S. (1987): Wirtschaftlich-technische Aspekte der Verwertung von REA-DENOX-Reststoffen in der Bauwirtschaft, in der Industrie, in der Landwirtschaft und im Gewässerschutz, in: Thomé-Kozmiensky, K.-H.: Recycling in der Bauwirtschaft, Berlin 1987, S. 326-340
- Meidlinger, A. (1994): Dynamisierte Bedarfsprognose für Ersatzteile bei technischen Gebrauchsgütern. Frankfurt, Berlin, 1994
- Meinhardt, S.; Bertsch, K. (1990): Schaumgips, eine Möglichkeit zur Entsorgung von REA-Gips, in: FhG Berichte, Heft 3/90, S. 31-35
- Meininger, S. (1997a): Vollständiges Schließen von Stoffkreisläufen mit Hilfe des Müller-Kühn-Verfahrens - Kreislaufführung von Gipsbaustoffen, in: F.I.R.: RLC-Interforum 97; Tagung vom 20.-22.04.1997 in Lana/Südtirol, 1997
- Meininger, S. (1997b): Verwertung von Gipsbaustoffen im Kühne-Verfahren, in: Beiträge des 13. Symposiums Recycling Baustoffe 21./22. November 1997 in Bremen, 1997
- Meißner, H. (1997): Verwendung von Recyclingmaterialien bei Bauprojekten, in: Thews, G.; Servatius, C.: Stoffkreisläufe in natürlichen und industriellen Prozessen. Stuttgart, Jena, 1997, S. 229-240
- Merl, A. (1996): Vergleich der methodischen Ansätze von Stoffhaushaltsstudien. Diplomarbeit am Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien, 1996
- Mettke, A. (1995): Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus. Taunusstein, 1995 (Reihe Umweltwissenschaften, Band 5)
- Meyerhoff, J.; Petschow, U. (1998): Einsatz ökonomischer Steuerungsinstrumente, in: Friege, H.; Engelhardt, C.; Henseling, K.O. (Hrsg.): Das Management von Stoffströmen. Geteilte Verantwortung – Nutzen für alle. Berlin, Heidelberg, 1998, S. 128-137
- Meyer-Krahmer, F. (1998): Industrial Innovation Strategies – Towards an Environmentally Sustainable Industrial Economy, in: Meyer-Krahmer, F. (Hrsg.): Innovation and Sustainable Development. Lessons for Innovation Policies. Heidelberg, 1998, S. 69-85
- Michaelis, P. (1993): Ökonomische Aspekte der Abfallgesetzgebung. Tübingen, 1993 (Reihe Kieler Studien, Band 254)
- Möller, R.; Jeske, U. (1995): Recycling von PVC: Grundlagen, Stand der Technik, Handlungsmöglichkeiten. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, wissenschaftlicher Bericht FZKA 5503. Karlsruhe 1995

- Mortimer, C. (1987): Chemie. 5. Auflage. Stuttgart, 1987
- Müller, J.H. (1976): Methoden zur regionalen Analyse und Prognose. 2. Auflage. Hannover, 1976
- Münch, F. (1998): Methoden der Stoffflussanalyse innerhalb einer Volkswirtschaft am Beispiel Blei. Dissertation, Universität Heidelberg, 1998
- Mund, D. (1993): Windbeutel aus Gips, in: Chemische Industrie, Heft 9/93, S. 15-16
- MVT (1997): FGD gypsum expertise, in: International Bulk Journal, Jg. 17, Heft 1/97, S. 21
- N.N. (1986): Verwertungskonzept für die Reststoffe aus Kohlekraftwerken – Gips aus der Rauchgasentschwefelung, in: VGB Kraftwerkstechnik, Jg. 66, Heft 4/86, S. 377-385
- N.N. (1993): Minerals Review Gypsum, in: American Ceramic Society Bulletin, Heft 6/93, S. 100
- N.N. (1994): Gipsschaum schützt vor Schall und Hitze. Blick durch die Wirtschaft, Nr. 26, 07.02.94
- N.N. (1994): Markt- und Strukturdaten der Steine- und Erden-Industrie, in: Die Natursteinindustrie, Heft 8/94, S. 26-30
- Nagel, C. (1995): Potentielle Arbeitsfelder der industriellen Kreislaufwirtschaft, in: Rinschede, A.; Wehking, K.-H.: Entsorgungslogistik III. Kreislaufwirtschaft. Berlin, 1995, S. 43-60
- Nausner, A. (1995): Ökobilanzierung von Baustoffen unter besonderer Berücksichtigung von Holz und Holzwerkstoffen, Stand der Technik. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 1995
- Neumann, K.; Morlock, M. (1993): Operations Research. München, Wien, 1993
- Neumüller, O.-A. (1987): Römpfs Chemie-Lexikon. 8. Auflage. Stuttgart, 1987
- Nicolai, M. (1994): Zur Konfiguration von verfahrenstechnischen Anlagen für das wirtschaftliche Recycling von Bauschutt. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993
- NLfÖ Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (1998): Stoffstrommanagement Gips als Beitrag zum nachhaltigen Ressourcenschutz in Niedersachsen – Vorstudie. Hildesheim, 1998 (Reihe Nachhaltiges Niedersachsen – dauerhaft umweltgerechte Entwicklung, Heft 4)
- Oehler, D. (1996): Betriebliche Stoffbuchhaltung und ökologische Bewertung eines Zementwerkes am Beispiel der Portlandcementwerke AG in Olten. Diplomarbeit, EAWAG Abt. S+E, 1996
- Offermann, H. (1988): Recycling von Bauschutt: Technische und ökonomische Grenzen bei der Verfahrenswahl. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1988
- Öko-Institut (1994): Bericht über die Auswirkungen der Abfallabgabe in Baden-Württemberg; Endbericht. Darmstadt, 1994
- Österreichisches Ökologie-Institut (1994): Abfalleinsatz in der Zementindustrie: eine kritische Betrachtung der ökologischen Auswirkungen. Wien, 1994

- Palinkas, T.; Weber, J. (1996): Vermeidung und Verwertung von Baurestmassen und Wiederverwendung von Bauteilen: Markt- und Technologiestudie. Dortmund, 1996 (Buchreihe Umwelt Zentrum Dortmund)
- Pape, L.-P. (1995): Untersuchungen zur Optimierung des Aluminiumkreislaufs. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1995
- Payer, H.; Turetschek, K. (1991): Indikatoren für die Materialintensität der österreichischen Wirtschaft. Forschungsbericht des IFF und des österreichischen Ökologie-Instituts. Wien, 1991 (IFF-Schriftenreihe Soziale Ökologie, Band 14)
- Pearce, D. W.; Turner, R. K. (1990): Economics of Natural Resources and the Environment. New York, London, 1990
- Peiser, W. (1991): Kohortenanalyse in der Konsumentenforschung. Wiesbaden, 1991
- Peters, W. (1984): Die Nachhaltigkeit als Grundsatz der Forstwirtschaft, ihre Verankerung in der Gesetzgebung und ihre Bedeutung in der Praxis. Dissertation, Universität Hamburg, 1984
- Petschow, U.; Hübner, K.; Dröge, S.; Meyerhoff, J. (1998): Nachhaltigkeit und Globalisierung: Herausforderungen und Handlungsansätze. Berlin, Heidelberg, 1998
- Pfeifer, G. (1996): Ressourcenschonender Wohnungs- und Städtebau, in: Das Bauzentrum, Heft 8/96, S. 30-34
- Phillips, K. (1998): Buoyant global demand, in: International Bulk Journal, Heft 2/98, S. 55-59
- Pietrzeniuk, H.-J. (1985): Entstehen durch die Entschwefelung der Kraftwerke neue Abfallprobleme? In: Müll und Abfall, Heft 4/85, S. 115-112
- Plassmann, C. (1964): Bestimmungsgründe der Nachfrage nach dauerhaften Konsumgütern. Berlin, 1964
- Puch, K.-H.; Berg, W. vom (1997): Nebenprodukte aus kohlebefeuelten Kraftwerken. Auswertung der VGB-Erhebungen für die Jahre 1985 bis 1996, in: VGB Kraftwerkstechnik, Jg. 77, Heft 7/97, S. 604-610
- Püchert, H. (1996): Ein Ansatz zur strategischen Planung von Kreislaufwirtschaftssystemen. Wiesbaden, 1996
- Rahlwes, K. (1993): Wiederverwertung von Baustoffen im Hochbau, in: 32. Darmstädter Seminar Abfalltechnik „Kreislaufwirtschaft Bau – Stand und Perspektiven beim Recycling von Baurestmassen“. Darmstadt, 1993, S. 120-141 (Schriftenreihe WAR Nr. 67)
- Rapp, K.; Schönborn, F. (1994): Human- und Ökotoxizität in auswirkungsorientierten Ökobilanzen. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1994
- Recker, M.; Kahl, D. (1995): Verwertung von Reststoffen der Braunkohlenkraftwerke der VEAG - Beitrag zur Kreislaufwirtschaft, in: VGB Kraftwerkstechnik, Jg. 75, Heft 11/95, S. 988-991
- Redclift, M. (1987): Sustainable Development. Exploring the Contradictions. London, 1987
- Reiche, J. (1995): Wissenschaftlicher Stand des Stoffflusskonzeptes, in: Umweltbundesamt: Fachgespräch zur Konzeption des Stoffflussrechts. Berlin, 1995 (Umweltbundesamt: UBA-Texte 18/95)

- Reiling, W. (1992): Prozessoptimierung zur Minimierung der Umweltbelastung mit Hilfe der quasi-dynamischen Simulation am Beispiel eines Kohlekraftwerkes mit Rauchgasreinigung. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992
- Renken, M. (1995): Nutzung recyclingorientierter Bewertungskriterien während des Konstruierens. Dissertation, Universität Braunschweig, 1995
- Rentz, O.; Ruch, M.; Nicolai, M., Spengler, Th., Schultmann, F. (1994): Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden: dargestellt am Beispiel des Hotel Post in Dobel, Landkreis Calw. Landsberg, 1994 (Reihe Umweltforschung in Baden-Württemberg)
- Rentz, O.; Schultmann, F.; Ruch, M.; Sindt, V. (1997): Demontage und Recycling von Gebäuden. Entwicklung von Demontage- und Verwertungskonzepten unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit. Landsberg, 1997
- Richter, K. (1995): Ökobilanzen von Baumaterialien, in: EMPA Tage „Energie und Umwelt“. Dübendorf, 1995
- Richter, K.; Fischer, M.; Galhmann, H.; Huser, A., Ménard, M. (1995): Energie- und Stoffbilanzen bei der Herstellung von Wärmedämmstoffen. EMPA Dübendorf, Abt. Holz, 1995
- Risse, F.; Jacobs, J., Berg, W. vom; Puch, K.-H. (1991): Nebenprodukte aus Kohlekraftwerken und Rückstände aus Müllverbrennungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland – Aufkommen und Verwertung 1981 bis 1989, in: VGB Kraftwerkstechnik, Jg. 71, Heft 5/91, S. 504-508
- Rogall, H. (1993): Ökologische Produktgestaltung. IZT-Werkstattbericht Nr. 5, 2. Auflage. Berlin, 1993
- Rösch, Ch. (1996): Vergleich stofflicher und energetischer Wege zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen – unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Baden-Württemberg. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, wissenschaftlicher Bericht FZKA 5857. Karlsruhe 1996
- Roskill (1997): The Economics of Gypsum and Anhydrite. 7th Edition. Roskill Information Services Ltd., London, 1997
- Ruskulis, O. (1997): Gypsum processing and use. ATBrief No. 19 in: Appropriate Technology, Vol. 23, No. 4/97, S. 17-20
- Ruth, M. (1995): Information, order and knowledge in economic and ecological systems: implications for material and energy use, in: Ecological Economics, Jg. 13 (1995), S. 99-114
- Ruth, M. (1995): Thermodynamic constraints on optimal depletion of copper and aluminum in the United States: a dynamic model of substitution and technical change, in: Ecological Economics, Jg. 15 (1995), S. 197-213
- Schachermayer, E.; Bauer, G.; Ritter, E.; Brunner, P.H. (1995a): Messung der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage. Wien, 1995 (Reihe Monographien des Umweltbundesamtes, Band 56)

- Schachermayer, E.; Lahner, T.; Bauer, G.; Brunner, P.H. (1997): Stoffflussanalyse und Vergleich zweier Aufbereitungstechniken für Baurestmassen. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft, 1997
- Schachermayer, E.; Rechberger, H.; Brunner, P.H.; Maderner, W. (1995b): Systemanalyse und Stoffbilanz eines kalorischen Kraftwerkes. Wien, 1995 (Reihe Monographien des Umweltbundesamtes, Band 67)
- Schanz, H. (1996): Forstliche Nachhaltigkeit. Sozialwissenschaftliche Analyse der Begriffsinhalte und Funktionen. Freiburg, 1996
- Schemmer, M.; Körner, G.; Lewandowski, D.; Johannsen, F. (1994): Erweiterung der Prozesskette „Produktentwicklung“ mit dem Ziel umweltgerechterer Produkte, in: Umweltwirtschaftsforum, Heft 5/94, S. 24-30
- Schießl, P.; Hohberg, I. (1994): Umweltverträglichkeit von Baustoffen, in: Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes. – Weimar, Jg. 40, Heft 5/6/7, S. 209-212
- Schmidt, H.-J. (1987): Gedanken zur Wirtschaftlichkeit im Baustoffrecycling, in: Thomé-Kozmiensky, K.-H. (Hrsg.): Recycling in der Bauwirtschaft. Berlin, 1987, S. 219-235
- Schmidt, M.; Schorb, A. (1995): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin, Heidelberg, 1995
- Schmidt-Bleek, F. (1994): Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - das Maß für ökologisches Wirtschaften. Berlin, Basel, 1994
- Schmitz, K.; Stannek, S (1991): Erhalt von Bauteilen: hohe Qualität, niedere Kosten. Köln, 1991
- Schultmann, F. (1998): Kreislaufführung von Baustoffen. Stoffflussbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden. Berlin, 1998 (Schriftenreihe Baurecht und Bautechnik, Bd. 10)
- SETAC (1993): A conceptual framework for life-cycle impact assessment. Workshop Sandestin, 01.02.-07.02.92. Pensacola, 1993
- SETAC (1993): Guidelines for Life-Cycle Assessment: a “Code of Practice”. Workshop Se-simbra, 31.03.-03.04.93. Brüssel, 1993
- Siegler, H.-J. (1993): Ökonomische Beurteilung des Recycling im Rahmen der Abfallwirtschaft. Frankfurt, 1993 (Reihe Europäische Hochschulschriften, Band 1438)
- Siegler, H.-J. (1993): Recycling in der Abfallwirtschaft – eine ökonomische Betrachtung, in: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung, Jg. 6, Heft 4/93, S. 490-499
- Söllner, F. (1996): Thermodynamik und Umweltökonomie. Heidelberg, 1996 (Reihe Umwelt und Ökonomie, Band 17)
- Sommer, K.; Rüdebusch-Thiemann, B; Spieß, A. (1992): REA-Gips aus Braunkohlekraftwerken als Nähr- und Hilfsstoff in Mineraldüngern für die Landwirtschaft, in: VGB Kraftwerkstechnik, Jg. 72, Heft 4/92, S. 377-382
- Souren, R. (1996): Analyse, Planung und Steuerung stofflicher Reduktionsprozesse bei inhomogener Abfallqualität, in: Umweltwirtschaftsform, Jg. 4, Heft 4/96, S. 13-19

- Souren, R. (1996): Theorie betrieblicher Reduktion. Grundlagen, Modellierung und Optimierungsansätze stofflicher Entsorgungsprozesse. Heidelberg, 1996 (Reihe Umwelt und Ökonomie, Band 16)
- Spengler, T. (1994): Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte. Betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomisch effizienten Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten. Berlin, 1994 (Reihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 67)
- SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen (1994): Umweltgutachten 1994 – Für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung. Bonn, 1994 (Deutscher Bundestag Drucksache Nr. 12/6995)
- SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen (1998): Umweltgutachten 1998. Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, 1998
- Starke, R. (1991): Deponieren von Rückständen aus Braunkohlenkraftwerken in Tagebauen, in: Glückauf, Jg. 127, Heft 19/20, S. 916-921
- Statistisches Bundesamt (1978): Systematik der Bauwerke. Ausgabe 1978. Stuttgart, Mainz, 1978
- Statistisches Bundesamt (1997a): Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern 1993. Fachserie 19, Reihe 1.2. Wiesbaden, 1997
- Statistisches Bundesamt (1997b): Produktion im Produzierenden Gewerbe 1996. Fachserie 4, Reihe 3.1. Wiesbaden, 1997
- Statistisches Bundesamt (1999): Bautätigkeit und Wohnungen 1997. Fachserie 5, Reihe 1. Wiesbaden, 1999
- Statistisches Bundesamt (1999): Bestand an Wohnungen 31.12.1995-31.12.1997. Fachserie 5, Reihe 3. Wiesbaden, 1999
- Steinhilper, R. (1993): Recyclinggerechte Konstruktion und Gestaltung von Beispielen, in: WEKA: Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung. Augsburg, 1993
- Steinhilper, R. (1994): Entwicklung eines technisch-logistischen Gesamtkonzepts zum Produktrecycling, in: Umweltwirtschaftsforum, Jg. 2, Heft 4, S. 31-37
- Sterr, T. (1999): Reduktionswirtschaft im Gebäude einer technosphärischen Stoffkreislaufwirtschaft. IUWA Heidelberg e.V., 1999
- Stoltenberg, U. (1995): Betriebliche Abfallwirtschaftskonzepte und Abfallbilanzen. Berlin, 1995 (Reihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 73)
- Strebel, H. (1997): Nachhaltige Wirtschaft – Sustainable Development als Problem einer umweltorientierten Betriebswirtschaftslehre, in: Umweltwirtschaftsform, Jg. 5, Heft 2/97, S. 14-20
- SUSTAIN (1994): Forschungs- und Entwicklungsbedarf für den Übergang zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in Österreich. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten und der Bundesländerkooperation. Wien 1994

- TA Abfall (1991): Gesamtfassung der zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) vom 12.03.1991. Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. BGBl I, S. 139
- TA Siedlungsabfall (1993): Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall) vom 14.05.1993. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstige Entsorgung von Siedlungsabfällen. Beil. Bundesanzeiger Nr. 99
- Täuber, U. (1987): Gemeinsames Verwertungskonzept der Elektrizitätswirtschaft und der Gipsindustrie für REA-Gips, in: Thomé-Kozmiensky, K.-H.: Recycling in der Bauwirtschaft, Berlin 1987, S. 252-266
- Technische Lieferbedingungen für Recyclingbaustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel – TLRC-ToB 95. Köln, 1995
- Tesch, W. (1994): Entsorgung von PVC-Bodenbelägen. Bedeutung der Gehalte an Blei und Cadmium, in: Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 22/94, S. 421-424
- Thamm, H.W. (1996): Marketing von Kraftwerksnebenprodukten in Deutschland, in: VGB Kraftwerkstechnik, Jg. 76, Heft 9/96, S. 782-790
- Thomé-Kozmiensky, K.-J. (1992): Materialrecycling durch Abfallaufbereitung. Berlin, 1992
- Tisdell, C. (1985): World Conservation Strategy, Economic Policies and Sustainable Resource Use in Developing Countries, in: The Environmental Professional, Vol. 7, 1985, S. 102-107
- Torghele, K. (1995): Beton im Wohnbau – ökologische Gesichtspunkte, in: IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und –ökologie (Hrsg.): Beton – Materialien für eine neue baubiologische und ökologische Position. Wien, 1995, S. 113-136
- Turner, R. K. (1997): Ecological Economics Lectures. Lecture course held at GKSS Research Centre, Geesthacht, 05.-06.08.1997; 17.-18.09.1997; 04.-05.12.1997
- Ullmann (1976): Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Band 12. 4. Auflage. Weinheim, 1976
- Umweltbundesamt (1990): Umweltgerechte Baustoffe. Bericht zum 9. Workshop „Ökologisches Bauen“ vom 20.-22.10.89 in Gummersbach (Umweltbundesamt: UBA-Texte 14/90)
- Umweltbundesamt (1997): Nachhaltiges Deutschland: Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Berlin, 1997
- Valdivia Mercado, S. (1995): Ökonomische Substitutionspotentiale für natürliche Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe – dargestellt am Beispiel der Entwicklung regionaler Konzepte zum Bauschuttrecycling. Frankfurt, 1995
- VDI (1993): VDI-Richtlinie 2243: Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte – Grundlagen und Gestaltungsregeln. Berlin, 1993
- VGB (Verband der Großkraftwerksbetreiber): Tätigkeitsbericht 1986/1987
- Vocht-Mields, R. (1989): Gipsgebundene Bauplatten. Trends in der Verfahrenstechnik, in: TIZ, Jg. 113, Heft 3/89, S. 187-192

- Voet, E.v.d.; Kleijn, R.; Oers, L.v.; Heijungs, R.; Huele, R.; Mulder, P. (1995): Substance Flows Through the Economy and Environment of a Region. Part I: Systems Definition, in: Environmental Science and Pollution Research, Jg. 2, Heft 2/95, S. 90-96
- Voet, E.v.d.; Kleijn, R.; Oers, L.v.; Heijungs, R.; Huele, R.; Mulder, P. (1995): Substance Flows Through the Economy and Environment of a Region. Part II: Modelling, in: Environmental Science and Pollution Research, Jg. 2, Heft 3/95, S. 137-144
- Volkart, K. (1981): Bauen mit Gips. Von Baugipsen und Gipsbauelementen und deren Verwendung. 10. Auflage, Darmstadt 1981
- Voss, G. (1997): Das Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung – Darstellung und Kritik. Köln, 1997
- Walker, I./Tränker, J. (1994): Undurchschaubares Gemenge: die Vielfalt der modernen Baumaterialien erschwert die Verwertung des zukünftig anfallenden Bauschutts, in: Müll-Magazin, Heft 1/94, S. 43-47
- Walz, R.; Ostertag, K.; Block, N. (1995): Synopse ausgewählter Indikatorenansätze für Sustainable Development. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) Karlsruhe, 1995
- Wätzold, F. (1998): Umweltökonomische Konzeptionen bei ökologischer Unsicherheit. Berlin, 1998
- Weibel, T.; Stritz, A.: Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Hochbaukonstruktionen. Zürich, 1995 (Reihe Energie-Stoffe-Umwelt der ETH Zürich, Nr. 1/95)
- Weißflog, E.; Demmich, J. (1990): Steinkohlenflugaschen und REA-Gips, in: Reimann, D.O.; Demmich, J.: Reststoffe aus der Rauchgasreinigung. Art – Behandlung – Verwertung – Entsorgung. Beihefte zu Müll und Abfall, Nr. 29. Berlin, 1990, S. 32-36
- Weizsäcker, E.U. von (1992): Erdpolitik. Ökologische Realpolitik an der Schwelle zum Jahrtausend. Darmstadt, 1992
- Weizsäcker, E.U. von; Jesinghaus, J.; Mauch, R. (1992): Ökologische Steuerreform – Europäische Ebene und Fallbeispiel Schweiz. Zürich, 1992
- Weßner, K. (1989): Strategische Marktforschung mittels kohortenanalytischer Design. Wiesbaden, 1989
- White, D. (1998): Gypsum supply. Building on firm foundations, in: Industrial Minerals, Vol. 364, Heft 1/98, S. 27-43
- White, P.; Franke, M.; Hindle, P. (1995): Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory. London, Glasgow, 1995
- Wicke, L. (1993): Umweltökonomie. München, 1993
- Wild, J. (1969): Unternehmerische Entscheidungen, Prognosen und Wahrscheinlichkeit, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 39, Heft 2/69, S. 60-89
- Wilke, B.C.; Jorden, W. (1994): Konstruktion recyclinggerechter technischer Produkte, in: Umweltwirtschaftsforum, Heft 5/94, S. 31-36

- Wimmer, F. (1995): Kohortenanalyse, in: Tietz, B.; Köhler, R.; Zentes, J. (Hrsg.): Handwörterbuch des Marketing. 2. Auflage. Stuttgart, 1995, Sp. 1153-1166
- Winnacker, K.; Küchler, L. (1983): Chemische Technologie, Band 2: Anorganische Technologie II. München, Wien, 1983
- Winteler, S.; Lohse, J. (1994): Gefährlicher Kreislauf. Der Schadstoffeintrag in Zementwerke muss verringert werden, in: Müllmagazin, Heft 1/94, S. 66-70
- Winterfeld, S. (1998): Rechtsvorschriften zur Umweltverträglichkeit in der Abfallwirtschaft, in: Heuel-Fabianek, B.; Schwefer, H.-J.; Schwab, J. (Hrsg.): Umweltverträglichkeit in der Abfallwirtschaft. Berlin, Heidelberg, New York, 1998, S. 1-25
- Wintermann, J. (1998): Alle Energieträger werden für Jahrzehnte benötigt. Weltenergiebericht gibt Prognose bis 2050 – der Bedarf verdoppelt sich in dieser Zeitspanne – Kernkraft legt erheblich zu, in: Handelsblatt, 29.09.1998
- Wirsching, F. (1985): Gips – Naturrohstoff und Reststoff technischer Prozesse, in: Chemie in unserer Zeit, Jg. 19, Heft 4/85, S. 137-143
- Wirsching, F. (1990): Verwertung von REA-Gips, in: VGB-Seminar Rauchgasreinigung und Reststoffentsorgung in Kraftwerken, Industrie- und Heizkraftwerken, Cottbus, 29./30.11.1990
- Wirsching, F.; Hüller, R.; Hoffmann, H.; Pürzer, A. (1994): Füllstoffe aus REA-Gips, in: Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes. – Weimar, Jg. 40, Heft 5/6/7, S. 221-227
- Wirsching, F.; Hüller, R.; Olejnik, R. (1994): Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen – Definitionen und Gesetzgebung in der Europäischen Union, der OECD und in Deutschland, in: Zement-Kalk-Gips, Jg. 47, Heft 12/91, S. 683-688
- Wirsching, F.; Hüller, R.; Stössel, H.-R. (1991): Erweiterung der Entsorgungsmöglichkeiten von REA-Gips durch Entwicklung von Calciumsulfat-Füllstoffen für Einsatzgebiete außerhalb der Bauindustrie. Abschlussbericht der Firma Knauf zum BMBF-Projekt „Minderung der Umweltbelastung bei der Nutzung fossiler Energien“. Iphofen, 1991
- WSZ (1995): Reststoffe als Rohstoffe, in: Chemie-Produktion, Heft August 1995, S. 90-92
- WSZ (1996): Die WSZ Schwefelsäure und Zement GmbH – ein Unikat oder ein Modell für die Zukunft? In: Zement-Kalk-Gips, Jg. 49, Heft 2/96, S. A33-A34
- Young, J.E.; Sachs, A. (1996): Creating a Materials-efficient Economy, in: Neue Technologien für die Kreislaufwirtschaft. Symposium Karlsruhe 21./22.05.96, herausgegeben vom Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), S. 5-1 – 5-38
- Zabel, H.-U. (1997): Entropie und Kreislaufwirtschaft, in: VDI (Hrsg.): Kreislaufwirtschaftskonzepte. Wirtschaftsforum, veranstaltet von der FET & WW gemeinsam mit der IHK Essen, 07.03.96. Düsseldorf, 1997, S. 55-96 (Fortschrittsberichte VDI Reihe 15 Nr. 180)
- Zangemeister, C. (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. 4. Auflage. München, 1976
- Zeidler, D. (1982): Recycling von Bauwerksteilen, Bauelementen und Abbruchmaterial, in: Fleischer, G. (Hrsg.): Vermeidung und Verwertung von Abfällen. Band 3. Berlin, 1982

- Zillessen, C. (1995): Einsatz von Kraftwerksreststoffen als Baustoff im untertägigen Steinkohlenbergbau, in: VGB Kraftwerktechnik, Jg. 75, Heft 4/95, S. 394-397
- Zimmermann, W. (1989): Operations Research – Quantitative Methoden der Entscheidungsvorbereitung. München, 1989
- Zöpel, C. (1987): Typische Schadenspunkte an Gebäuden, in: Deutsches Architektenblatt, heft 9/87, S. 1021-1027
- Zundel, S. (1998): Stoffstrommanagement und Innovation, in: Friege, H.; Engelhardt, C.; Henseling, K.O. (Hrsg.): Das Management von Stoffströmen. Geteilte Verantwortung – Nutzen für alle. Berlin, Heidelberg, 1998, S. 213-219
- ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (1993): Lösungskonzept der deutschen Elektroindustrie für die Verwertung und Entsorgung elektrotechnischer und elektronischer Geräte – ZVEI Memorandum zum Entwurf der „Elektronikschrottverordnung“. Frankfurt, 1993

9. GLOSSAR

Abfall	Abfall im Sinn des KrW-/AbfG sind alle beweglichen Sachen, die unter die in Anhang I des KrW-/AbfG aufgeführten Gruppen fallen und deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung ⁴⁹⁸ .
Anhydrit	„Trockener“ Gips ohne eingelagertes Wasser (reines CaSO ₄), kommt in der Natur vor. Anhydrit wird hauptsächlich als Erstarungsregler in der Zementindustrie eingesetzt.
Anthroposphäre	Gesamtheit aller Bereiche der Umwelt, in die der Mensch eingreift, egal ob sie dem reinen Überleben gewidmet sind (wie Nahrungsbeschaffung, Fäkalienentsorgung etc.) oder technischem bzw. kulturellem Tun entspringen ⁴⁹⁹ . Sie besteht aus den vier Bereichen Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe, Privathaushalt und Abfallbehandlung, in denen biologische und technische Prozesse in einem offenen System ablaufen, durch die Güter als Stoffträger, Energie und Information fließen ⁵⁰⁰ . Der Begriff der Technosphäre wird in dieser Arbeit als Synonym für die Anthroposphäre verstanden.
Bauschutt	Mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten (Erdreich, Beton, Ziegel, Kalksandsteine, Mörtel, Gips, Leichtbaustoffe, Fliesen, Dämmmaterial etc.)
Baustellenabfälle	Nicht mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten (Metalle, Holz, Kunststoffe, Verpackungsmaterial, Kabel, Farben, Lacke, Klebstoffe, Isoliermaterialien etc.).
Bewirtschaftung	Einsammeln, Beförderung, Verwertung und Beseitigung der Abfälle, einschließlich der Überwachung dieser Vorgänge sowie der Überwachung der Deponien nach deren Schließung ⁵⁰¹ . Neben dieser auf die Abfallseite spezifizierten Definition wird in dieser Arbeit unter Bewirtschaftung auch der sinnvolle Umgang mit den Stoffströmen der Versorgung sowie dem Stofflager, auch und gerade im Hinblick auf zukünftige Ereignisse, verstanden.

⁴⁹⁸ v. Köller (1996, S. 89)

⁴⁹⁹ SUSTAIN (1994, S. 15)

⁵⁰⁰ Baccini/Brunner (1991, S. 10)

⁵⁰¹ Art. 1 der Richtlinie 91/156/EWG

Biosphäre	Die Biosphäre ist ein stabiles, komplexes, sich anpassendes und sich entwickelndes Lebenssystem, welches die Fähigkeit hat, sowohl die wichtigsten geologischen Prozesse der Erdkruste optimal zu nutzen als auch genügend freie Energie zu produzieren, um technische Systeme der Anthroposphäre zu stützen ⁵⁰² .
Dihydrat	„Nasser“ Gips mit eingelagerten Wasseratomen ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), kommt in der Natur vor
Dispersion	Verteilung eines Stoffes in einem zu untersuchenden, begrenzten Gebiet.
Dispersionsgrad	Art und Ausmaß der Verteilung eines Stoffes in einem zu untersuchenden, begrenzten Gebiet unter dem Gesichtspunkt zur Eignung des Stoffes zur Kreislaufführung. Das Gebiet kann sich dabei bis zur gesamten Anthroposphäre erstrecken, häufig wird der Dispersionsgrad jedoch auf ein Produkt bezogen.
Eluation	Auswaschung aus einem festen Material, die ausgewaschene Flüssigkeit wird als Eluat bezeichnet
Entsorgung	Maßnahmen und technische Verfahren zur Beseitigung und Veränderung von Abfällen ⁵⁰³ . Sie umfasst im KrW-/AbfG die Abfallverwertung und die Abfallbeseitigung.
Ettringit	Säulenartige Minerale, die sich ausbilden, wenn bei einem permanenten Gipsüberangebot und einer hohen Kalkkonzentration reaktionsfähige Tonerde hinzutritt; führt in der Regel zu Festigkeitsverminderungen und Treiberscheinungen.
Gefahrstoff	Stoffe, die das Potenzial haben, auf den Menschen, andere Lebewesen, auf die einzelnen Ökosysteme oder auf Sachgüter eine schädigende Wirkung auszuüben.
Gipstreiben	Nachhaltige Festigkeitsverminderung in Materialien durch gipsbedingte Ettringitbildung.
Halbhydrat	Künstlich erzeugter Gipszustand mit einem eingelagerten Wasseratom ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) zum späteren Einsatz auf der Baustelle.
Kreislaufwirtschaft	Wirtschaftsform mit dem Ziel ist es, Material- und Güterströme zu schließen, um eine möglichst emissionsarme und ressourcenschonende Nutzung auf hohem Wertschöpfungsniveau zu erzielen. Aufgrund der thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten sind aber immer Energiezufuhr und die Ein- und Ausschleusung von Stoffen erforderlich. Kreislaufwirtschaft eignet sich daher nur als visionäres Leitbild.

⁵⁰² Baccini et al. (1993, S. 2)

⁵⁰³ Souren (1996, S. 14)

Monodeponie	Deponie oder Deponiebereich für die zeitlich unbegrenzte Ablagerung von Abfällen, die nach Art, Schadstoffgehalt und Reaktionsverhalten ähnlich und untereinander verträglich sind. In Monodeponien sollen möglichst gleichartige und konzentrierte Stoffgemische über Jahrzehnte gelagert werden, damit diese die Ressourcenstätten von morgen bilden können.
Puzzolanität	Reaktionsvermögen von SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 mit Kalk und Wasser unter Bildung wasserunlöslicher, zementähnlicher Erhärtungsprodukte.
Rauchgasentschwefelung	Verfahren zur Begrenzung der SO_2 -Emissionen von kohlebefeuerten Kraftwerken auf 400 mg/m^3 . Bei ca. 95 % der installierten Kraftwerke wird das Kalksuspensionsverfahren (Nasswäsche mit Endprodukt REA-Gips) angewendet. Sonst kommt meistens das Sprühabsorptionsverfahren (Endprodukt SAV-Produkt) zum Einsatz.
Recycling	Erneute oder wiederholte Verwendung oder Verwertung von Abfällen. Als Verwertungsmöglichkeiten werden das chemische Recycling (Gewinnung von Wertstoffen durch chemische Umwandlung), das rohstoffliche Recycling (chemisches Recycling bis zur untersten Rohstoffstufe wie Rohöl) und das werkstoffliche Recycling (Erhalt der Werkstoffeigenschaften wie z.B. Glas) unterschieden ⁵⁰⁴ .
Redukt	Synonym zu Abfall. Inputfaktor in die Reduktion.
Reduktion	Teilbereich der Produktion im weiteren Sinne, die durchgeführt wird, um Abfälle (Redukte) aktiv in materieller, zeitlicher oder räumlicher Hinsicht zu verändern (vernichten bzw. umwandeln).
SAV-Produkt	Reststoff aus dem Sprühabsorptionsverfahren zur Rauchgasentschwefelung, bei dem eine Kalksuspension überstöchiometrisch in den Rohgasstrom eingeblasen wird. Als Endprodukt wird ein feinkörniges Feststoffgemisch, das zu 70 % aus Calciumsulfit besteht, im Elektrofilter abgeschieden. Für das SAV-Produkt gibt es keine direkte Verwendungsmöglichkeit. Dieses Verfahren zur Rauchgaswäsche wird bei Kraftwerken mit einer Leistung bis ca. 200 MW angewendet (ca. 5 % der installierten Kraftwerksleistung).
Schadstoff	Von „Umweltschadstoff“, „Schadstoff“ oder „umweltgefährlichen Stoffen“ darf im streng wissenschaftlichen Sinn nur gesprochen werden, wenn bei Umweltchemikalien die Schädigung nachgewiesen ist, d.h. ein Stoff in Mengen vorkommt, die zu Schädigungen führen können ⁵⁰⁵ .

⁵⁰⁴ vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 717)

⁵⁰⁵ ITAS/ifib (1998, S. 157)

Stoffstrom	Der Weg eines Stoffes von seiner Gewinnung als Rohstoff über die verschiedenen Stufen der Veredelung bis zur Stufe des Endprodukts, den Gebrauch/Verbrauch des Produkts, ggf. seine Wiederverwendung/-verwertung bis zu seiner Entsorgung ⁵⁰⁶ . Jede Bewegung von Stoffen, jedes Verlagern von Materie von einem Ort an einen anderen ist ein Stoffstrom. Stoffströme haben Auswirkungen auf ökologische Zusammenhänge ⁵⁰⁷ . Synonym hierzu ist Stofffluss.
Stoffstrommanagement	Stoffstrommanagement ist das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffströmen oder Stoffsystemen, wobei die Zielvorgaben aus dem ökologischen und ökonomischen Bereich kommen, unter Berücksichtigung von sozialen Aspekten. Die Ziele werden auf betrieblicher Ebene, in der Kette der an einem Stoffstrom beteiligten Akteure oder auf der staatlichen Ebene entwickelt ⁵⁰⁸ .
Technosphäre	Subsystem der Ökosphäre, das alle menschlichen Aktivitäten umfasst. Auf der Inputseite sind alle Stoffe einbezogen, sobald sie von Mensch oder Maschine berührt werden. Auf der Outputseite ist die Grenze der Technosphäre dort erreicht, wo die kommerziellen Interessen des Menschen an den Stoffströmen aufhören ⁵⁰⁹ . Der Begriff der Anthroposphäre wird in dieser Arbeit als Synonym für die Technosphäre verstanden.
Weiterverwendung	Erneute Verwendung eines gebrauchten Produkts für einen anderen Zweck, für den es ursprünglich nicht hergestellt wurde (z.B. Ziegelsteine als Randbegrenzung für Grünanlagen).
Weiterverwertung	Einsatz von Altstoffen und Produktionsrückständen in einem von diesen noch nicht durchlaufenen Produktionsprozess (z.B. Ziegelsplitt als Pflanzsubstrat in der Dachbegrünung).
Wiederverwendung	Erneute Nutzung eines gebrauchten Produkts für den gleichen Verwendungszweck, für den es ursprünglich hergestellt wurde (z.B. ausgebaute Fenster).

⁵⁰⁶ vgl. Enquête-Kommission (1994, S. 719)

⁵⁰⁷ vgl. Schmidt-Bleek (1994, S. 40)

⁵⁰⁸ Enquête-Kommission (1994, S. 719)

⁵⁰⁹ Schmit-Bleek (1994)

10. ANHANG

Anhang 1: Maximal erlaubte Schadstoffkonzentrationen im Eluat gemäß gesetzlichen Regelungen

Anhang 2: Tabellen zur Berechnung der Stoffströme Gips und Schwefel in Oberösterreich

- Stoffkonzentrationen Schwefel in Baustoffen nach Literaturangaben
- Stoffflüsse und Stofflager an Schwefel in der Bauwirtschaft und der Abfallwirtschaft von Oberösterreich
- Flüsse und Lager von Indikatorenstoffen in der Bauwirtschaft von Oberösterreich
- Stoffflüsse und Stofflager von Gips in der Bauwirtschaft von Oberösterreich
- Aufteilung des Lagers im Hochbau Oberösterreichs auf Baustoffe sowie Bestimmung von Schwefelgehalten
- Abschätzung der Schwefelflüsse durch Gütertransport von Baumassen in Oberösterreich

Anhang 3: Kohortentabellen für Gipsprodukte 1970-2050

Anhang 3a: Szenario 1: Linearer Bestandszuwachs auf Basis der Produktion 1997

Anhang 3b: Szenario 2: Substitution durch andere Baustoffe, leichtere Bauweise sowie Umstieg auf Gipsprodukte mit geringeren Dispersionsgrade

Anhang 4: Mathematische Formulierung des Warehouse-Location-Problems

Anhang 1: LAGA-TaSi-Grenzwerte

Anhang 1: Maximal erlaubte Schadstoffkonzentrationen im Eluat gemäß gesetzlichen Regelungen									
Parameter	Einheit	VVBW 91	TaSi 93		LAGA 95				TWVO 90
			Dep.kl. I	Dep.kl. II	Z0	Z1.1	Z1.2	Z2	
Schadstoffkonzentration im Eluat									
pH		7-12,5	5,5-13	5,5-13					6,5-9,5
Leitfähigkeit	µS/cm	1000	10000	50000	500	1500	2500	3000	2000
Fluorid	mg/l		5	25					1,5
Chlorid	mg/l	100			10	20	40	150	250
Sulfat	mg/l	600			50	150	300	600	240
TOC (Total organic carbon)	%		20	100					
Cyanid gesamt	mg/l	0,1							0,05
Cyanid leicht freisetzbar	mg/l		0,1	0,5					
Ammonium	mg/l	0,5	4	200					0,5
Arsen	µg/l	100	200	500	10	10	40	50	10
Blei	µg/l	100	200	100	20	40	100	100	40
Cadmium	µg/l	5	50	100	2	2	5	5	5
Chrom gesamt	µg/l	50			15	30	75	100	50
Chrom VI	µg/l		50	100					
Kupfer	µg/l	100	1000	5000	50	50	150	200	
Nickel	µg/l		200	1000	40	50	100	100	50
Quecksilber	µg/l	1	5	20	0,2	0,2	1	2	1
Zink	µg/l	500	2000	5000	100	100	300	400	
Phenole	µg/l	100	0,2	50	10	10	50	100	0,5
Kohlenwasserstoffe	mg/l	0,1							0,01
AOX (adsorbierbare organisch gebundene Halogene)	mg/l	0,1	0,3	1,5					
Schadstoffkonzentration im Feststoff									
Arsen	mg/kg				20				
Blei	mg/kg				100				
Cadmium	mg/kg				0,6				
Chrom gesamt	mg/kg				50				
Kupfer	mg/kg				40				
Nickel	mg/kg				40				
Quecksilber	mg/kg				0,3				
Zink	mg/kg				120				
Kohlenwasserstoffe (H18)	mg/kg				100	300	500	1000	
PAK (Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe)	mg/kg				1	5 (20) ¹	15 (50) ¹	75 (100) ¹	
EOX (extrahierbare organisch gebundene Halogene)	mg/kg				1	3	5	101	
PCB (Polychlorierte Biphenyle)	mg/kg				0,021	0,1	0,5	1	
TOC (Total organic carbon)	Masse-%		1	3					

Anhang 2: Berechnung der Stoffströme Gips und Schwefel in Oberösterreich

Stoffkonzentrationen Schwefel in Baustoffen nach Literaturangaben in mg/kg

Gut, Bestandteil	Wert 1		Wert 2		alle Werte	
	von	bis	von	bis	von	bis
sortierter Bauschutt	1.400	2.900			1.400	2.900
Bodenaushub	160	510			160	510
Betonabbruch	1.100	1.700			1.100	1.700
Asphaltaufruch	1.200	3.500			1.200	3.500
Baustellenabfälle	6.060	6.060	8.530	8.530	6.060	8.530
Beton, Zement, Mörtel, Gasbeton	1.000	1.500			1.000	1.500
mineralische Baustoffe					-	-
organische Baustoffe					-	-
Altasphalt und Bauschutt (fein)					-	-
Tegel					-	-
Basalt					-	-
Marmor					-	-
Holz (Spannplatten, Holzspäne)	1.900	2.000			1.900	2.000
Kunststoffe	1.500	3.700			1.500	3.700
Stahl (Bau-, Bewehrungsstahl)	200	500			200	500
Bitumen	30.000	50.000			30.000	50.000
Ziegel, Gipsziegel					-	-
Gips, Kalk	62.016	93.023			62.016	93.023
Glas	900	900			900	900
Dämmstoffe					-	-
geologischer Mittelwert in Ö					-	-
keramische Baustoffe					-	-
Kies, Sand, Schotter, Splitt, Stein	160	510			160	510
sonstige Metalle	400	400			400	400
Straßenbauquert (Bitumen 4-7%)	1.200	3.500			1.200	3.500
Zement	10.000	16.000			10.000	16.000
Gips	186.000	235.000			186.000	235.000
					-	-
pflanzliche+tierische Abfälle	200	1.600			200	1.600
Papier	2.000	2.000			2.000	2.000
Textilien	650	2.500			650	2.500
Siedlungsabfall	1.000	2.000			1.000	2.000
Separatabfall	2.000	3.000			2.000	3.000

Referenzen (Autoren, Jahr, Seitennummer)

Schachermayer et al. 1996 (S. 30)

Schachermayer et al. 1996 (S. 30)

Brunner & Stämpfli (1993, S. 36)

Annahme: gleicher Gehalt wie Bituminöses

Ellenberg et al. 1986 (S. 384), BASORAG 1991

eigene Annahme: 0,5%-0,7% Gips im Beton

Baccini et al. (1993, S. 120)

Baccini et al. (1993, S. 120)

Krenkler (S. 413)

Frischknecht et al. (1995, S. IV-19)

Annahme: S-Gehalt in Gips 24 %, in Kalk 0 %;

Verhältnis Gips:Kalk = 1:3 (min); 1:2 (max)

Baccini et al. (1993, S. 120)

Annahme: gleicher Gehalt wie Erdkruste

Baccini et al. (1993, S. 120)

nach BUWAL (1995, S.42) u. Zeile Bitumen

BMUJF & BMLF (1991, S. 2)

S-Anteil in CaSO_4 bzw. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Baccini et al. (1993)

Baccini et al. (1993)

Baccini et al. (1993)

Baccini et al. (1993)

Baccini et al. (1993)

Stoffflüsse und Stofflager an Schwefel in der Bauwirtschaft und der Abfallwirtschaft von Oberösterreich				
	Güterfluss bzw. -lager (in kg/E.a bzw. kg/E)	Stoffflüsse bzw. -lager S (kg/E.a bzw. kg/E)		
Anfall Baurestmassen 1994				
Bodenaushub (erfasst)	800	0,13	0,41	
Bodenaushub (nicht erfasst)	2.650	0,42	1,35	
sämtliche Baurestmassen (erfasst)	410	0,57	1,19	
sämtliche Baurestmassen (nicht erfasst)	1.250	1,75	3,63	
TOTAL OUTPUT BAUWESEN	5.110	3	7	
globale Schwefelkonzentration im Output Bauwesen (g/t)		563	1.286	
Verbleib Baurestmassen 1994				
Bodenaushub in die Abfallwirtschaft	100%	0,55	1,76	
Baurestmassen in die Abfallwirtschaft	95%	2,30	4,75	
Input in die WV (Baurestmassen 1)	80%	0,44	0,90	
Aufbereitetes Material (Recyclingmaterialien 1)	85%	0,37	0,77	
Rückstände aus Aufbereitung (Emissionen 2)	15%	0,07	0,14	
Baurestmassen in die Deponie (Baurestmassen 2)	20%	0,14	0,29	
Baurestmassen in die sonst. Entsorg. (Baurestmassen 3)		1,72	3,57	
Baurestmassen sonstige Abfallwirt. (Baurestmassen 4)	5%	0,03	0,06	
LAGER ABFALLWIRTSCHAFT BAUWESEN	75.000	42	96	
Anfall sonstige Abfallmengen 1994				
Bioabfall	166	0,03	0,27	
Biologische Restmüllbehandlung	25	0,02	0,05	
Altstoffe	181	0,36	0,54	
System- und Sperrmüll	278	0,28	0,56	
Baurestmassen sonstige Abfallwirt. (Baurestmassen 4)	256	0,03	0,06	
TOTAL OUTPUT SONSTIGE	905	0,73	1,47	
globale Schwefelkonzentration im Output Sonstige (g/t)		803	1.628	
Verbleib sonstige Abfallmengen 1994				
Bioabfall				
Kompost	60%	0,02	0,16	
Umwelt	30%	0,01	0,08	
Deponie	10%	0,00	0,03	
Altstoffe				
Wiederverwendung	85%	0,31	0,46	
Deponie	15%	0,05	0,08	
Biologische Restmüllbehandlung				
Rotteverlust	10%	0,00	0,00	
Deponie	90%	0,02	0,04	
Verbrennung	20%			
Reingas	1%	0,00	0,00	
Verbrennungsrückstände	99%	0,05	0,11	
Direktdeponierung	80%	0,25	0,50	
		0,73	1,47	
Summe Wiederverwendung sonstige Abfallmengen		0,31	0,46	
Summe Umwelt sonstige Abfallmengen		0,03	0,24	
Summe Deponie sonstige Abfallmengen		0,39	0,77	
LAGER SONSTIGE ABFÄLLE	25.000	20	41	

Flüsse und Lager von Indikatorenstoffen in der Bauwirtschaft von Oberösterreich (Angaben in kg/E.a bzw. kg/E)											
Güterliste "Bauwirtschaft"	Güterfluss bzw. -lager	S		TOC		Fe		Zn		Pb	
		von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Beton	2.800	3	4	0,3	1,4	5	45	0,03	0,14	0,01	0,3
Sand, Kies, Schotter, Splitt, Steine	7.600	1,2	3,9	-	-	28	28	0,04	1,5	0,01	0,8
Bodenmaterial	3.500	0,6	1,8	18	70	60	70	0,1	0,6	0,04	0,23
Bau- und Schalungsholz	101	0,2	0,2	39	40	-	-	0,001	0,3	0,001	0,2
Zement	400	4	6	0,04	0,2	0,7	6	0,004	0,02	0,002	0,04
Bituminöses	46	1,4	2,3	5	26	-	-	0,000	0,00	0,000	0,1
Kalk	148	0,02	0,08	-	-	-	-	0,001	0,01	0,001	0,01
Gips	77	14,3	18	-	-	-	-	0,000	0,01	0,001	0,01
Baustahl	71	0,01	0,04	-	-	70	71	0,0004	0,004	0,0007	0,07
Kunststoffe im Bauwesen	3	0,004	0,009	1,3	1,8	-	-	0,001	0,003	0,0005	0,002
Glas im Bauwesen	15	0,01	0,01	-	-	-	-	0,0001	0,002	0,0002	0,002
Aluminiumerzeugnisse	4	0,002	0,002	-	-	0,02	0,19	-	-	-	-
sonstige Metalle	10	0,004	0,004	-	-	0,05	0,50	0,01	2	0,01	9
keramische Erzeugnisse	3	-	-	0,02	0,06	-	-	0,00006	0,0005	0,00002	0,0002
Ziegel	538	-	-	-	0,5	-	-	0,01	0,08	-	-
Hilfstoffe, Betriebsmittel	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Baumaschinen und -geräte	7	0,001	0,003	-	-	7	7	0,00003	0,0003	0,00007	0,007
sonstige Güter im Bauwesen	4	0,02	0,02	0,02	0,02	4	4	0,00009	0,0002	0,00004	0,008
TOTAL INPUT BAUWESEN	15.329	25	37	63	141	174	231	0,2	4,7	0,1	11
ohne Bodenmaterial	11.829	24	35	46	71	114	161	0	4	0,04	10
globale Stoffkonzentration Input (g/t)		1.601	2.414	4.125	9.173	11.325	15.094	15	310	5	697
Wohnbauten (HB)	85.000	136	205	351	780	963	1.283	0,9	13	0	59
Sonstiger Hochbauten (HB)	65.000	104	157	268	596	736	981	0,7	10	0	45
Straßen (TB)	230.000	368	555	949	2.110	2.605	3.472	2,3	21	1	160
Leitungen (TB)	3.000	5	7	12	28	34	45	0,05	0,9	0	2
Bahn (TB)	4.500	7	11	19	41	51	68	0,07	1,4	0	3
sonstige Lager	20.000	32	48	83	183	226	302	0,30	6,2	0	14
TOTAL LAGER BAUWESEN	407.500	652	984	1.681	3.738	4.615	6.151	4	52	2	284
globale Stoffkonzentration Lager (g/t)		1.601	2.414	4.125	9.173	11.325	15.094	15	310	5	697
Bodenaushub (erfasst)	800	0,13	0,41	4	16	14	16	0,0	0,1	0,01	0,05
Bodenaushub (nicht erfasst)	2.650	0,42	1,35	13	53	45	53	0,1	0,5	0,03	0,17
sämtliche Baurestmassen (erfasst)	410	0,57	1,19	0,57	7,79	0,82	4,51	0,04	0,36	0,003	0,29
sämtliche Baurestmassen (nicht erfasst)	1.250	1,75	3,63	1,75	23,75	2,50	13,75	0,13	1,11	0,01	0,88
TOTAL OUTPUT BAUWESEN	5.110	3	7	20	101	62	87	0,3	2,1	0,1	1,4
globale Stoffkonzentration Output (g/t)		563	1.286	3.831	19.675	12.127	17.076	61	414	11	274
globale Stoffkonzentration Output ohne Bodenmaterial (g/t)		1.400	2.900	1.400	19.000	2.000	11.000	106	889	8	706
Input in die Aufbereitung (Baurestmassen 1)	80%	0,46	0,96	0,46	6,27	0,66	3,63	0,03	0,29	0,00	0,23
Aufbereitetes Material (Recyclingmaterialien 1)	85%	0,39	0,81	0,39	5,32	0,56	3,08	0,03	0,25	0,00	0,20
Baurestmassen in die Deponie (Baurestmassen 2)	20%	0,11	0,23	0,11	1,52	0,16	0,88	0,01	0,07	0,00	0,06
Baurestmassen in die sonst. Entsorg. (Baurestmassen 3)		1,75	3,63	1,75	23,75	2,50	13,75	0,13	1,11	0,01	0,88
Input sonst. Abfallwirtschaft (Baurestmassen 4)	15%	0,07	0,15	0,07	0,95	0,10	0,55	0,01	0,04	0,00	0,04

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Stoffflüsse und Stofflager von Gips in der Bauwirtschaft von Oberösterreich (Angaben in kg/E.a bzw. kg/E)										
2											
3		Wert 1		Wert 2		Wert 3		Wert 4		alle Werte	
4		von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
5	INPUT VON GÜTERN										
6	Putz/Mörtel	45.021	45.021	20.250	47.250					20.250	47.250
7	Anhydritestrich	2.333	5.443							2.333	5.443
8	Gipskleber	1.800	2.500							1.800	2.500
9	Gipskartonplatte, Gipsplatten	47.345	77.636							47.345	77.636
10	Zement	38.592	60.300	29.437	38.287					29.437	60.300
11	TOTAL INPUT									101.165	193.130
12	BESTAND VON GÜTERN										
13	Putz/Mörtel	833.625	2.244.375	369.376	2.818.922					369.376	2.818.922
14	Estrich	66.485	155.131							66.485	155.131
15	Montagegips	38.256	35.180	14.195	58.179					14.195	58.179
16	Gipskartonplatte	241.500	327.750	74.230	437.007					74.230	437.007
17	Gipsplatte	764.750	764.750	299.130	1.369.703					299.130	1.369.703
18	Zement	321.774	1.955.305							321.774	1.955.305
19	TOTAL LAGER									1.145.189	6.794.245
20	OUTPUT VON GÜTERN										
21	Putz/Mörtel Abbruch	4.050	18.000	3.848	17.100	6.210	27.600	5.265	23.400	3.848	27.600
22	Putz/Mörtel Umbau	6.300	14.175	7.720	17.370					6.300	17.370
23	Zement	1.133	6.710							1.133	6.710
24	Platten Abbruch	1.750	7.779							1.750	7.779
25	Platten Umbau	1.750	7.779							1.750	7.779
26	TOTAL OUTPUT									14.781	67.238
27	VERBLEIB DES OUTPUT										
28	Bauschuttanlage	2.356	3.660							2.356	3.660
29	Recyclingmaterialien 1	1.696	2.342							1.696	2.342
30	Fluss Sortieranlage -> Deponie	660	1.317							660	1.317
31	Deponie	1.470	4.939							1.470	4.939
32	Hausmüll	490	1.646							490	1.646
33	Sonstige Entsorgung	10.465	56.993							10.465	56.993

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
35	Faktoren:	von	bis				von	bis	Gipsanteil im	Putz/Mörtel im	Bauschutt
36											
37	Anteil OÖ an Österreich	18%	25%		Lager Hochbau OÖ		95.000.000	435.000.000		Abbruch	Umbau
38	% Gips an Leichtputz	70%	100%		Neue Wohnungen in OÖ		9.000		Dt.Gipsverb.	0,90%	
39	% Gips an Grundputz	20%	50%		Wohnungsbestand in OÖ		513.000		Andrä	0,86%	3,15%
40	% Gips an Anhydritestrich	40%	80%		Wohnungsgröße (m²)		90		Rentz	1,38%	
41	% Gips an Gipskartonplatte	70%	90%		Abbruch Hochbau (Mg)		450.000	2.000.000	ITAS/lflb	1,17%	3,86%
42	% Gips an Gipsplatte	95%	95%		Abbruch Tiefbau (Mg)		200.000	200.000			
43	% Gips an Zement	4%	5%		Umbaurestmasse (Mg)		200.000	450.000	Minimum	0,86%	3,15%
44	% Gips an Beton	12%	15%		Neubaurestmasse (Mg)		100.000	150.000	Maximum	1,38%	3,86%
45	Dichte Estrich (Mg/m³)	1,8	2,1		% Beton an Abbr. Hochbau		30%	30%			
46	Dichte Putz (Mg/m³)	0,8	1,2		% Beton an Abbr. Tiefbau		50%	50%			
47	Dicke Estrichauftrag (m)	0,04	0,04		% Zement an Abbruch		1,8%	1,8%			
48	Innenputz pro Wohnung (Mg)	5	7		Input an Sortieranlage (Mg)		220.000	220.000			
49											
50	Referenzen / Annahmen	Zelle BC6: amtliche Statistik									
51		Zelle BC9: amtliche Statistik abzüglich Exporte									
52		Zelle BC10: amtliche Statistik Zementabsatz									
53		Zelle DE6: BUWAL (Faustformel pro Wohnung)									
54		Zelle DE10: amtliche Statistik Betonprodukte + sonstiger Zement									
55		Zelle BC13: BUWAL (Faustformel, 75% Grundputz)									
56		Zelle DE13/16: ITAS/lflB (50% Gips im Gipsmörtel)									
57		Zelle BC14: Nutzfläche mit 5% Anhydritestrich									
58		Zelle BCDE15: Verbaute Gipsplatten * (Gipskleber / Gipsplatte)									
59		Zelle BC16/17: Input-Output-Schätzung									
60		Zelle DE17: Glenck et al. 1996, Tab. 15									
61		Zelle BC18: ITAS/lflB-Betonlager + Zementlager									
62		Zelle BC21: Dt. Gipsverband (Anteil 3%, Gipsgehalt 30 %)									
63		Zelle DE21: Andrä (Anteil 5,7 %, Gipsgehalt 15 %)									
64		Zelle FG21: Rentz (Anteil 9,2 %, Gipsgehalt 15 %)									
65		Zelle HI21: ITAS/lflB (Anteil 11,7 %, Gipsgehalt 10 %)									
66		Zelle BC22: Andrä (Anteil 21 %, Gipsgehalt 15 %)									
67		Zelle DE22: ITAS/lflB (Anteil 38,6 %, Gipsgehalt 10 %)									
68		Zelle BC23: Zement aus Hochbaubeton, Tiefbaubeton und sonstigen Zementanwendungen									
69		Zelle BC24/25: Glenck et al. 1996, Tab. 15. Annahme: Umbaumasse = Abbruchmasse									
70		Zelle BC28: Gips aus Putz/Mörtel und aus Beton/Zement. Gips aus Platten ist nicht rezyklierbar									
71		Zelle BC29: Annahme: 70-90% des Gipses gehen in Feinfraktion, wovon 60 % wiederverwertet werden; Rest wird komplett wiederverwertet									
72		Zelle BC31: Annahme: 15 % des Umbauschutts									
73		Zelle BC32: Annahme: 5 % des Umbauschutts									

Abschätzung der Schwefelflüsse durch Gütertransport von Baumassen in Oberösterreich**Güterverkehr****Flottenbezogene Berechnung:****Tabelle 1:** Fahrzeugflotte und Gesamtfahrleistung des Güterverkehrs in OO, berechnet aus Fahrzeugbestand und mittleren Fahrleistungen

Typ	Fahrzeugbestand (1991)				Mittlerer Verbrauch (l/100km)				Transportdistanz/Jahr	
	(Elektrisch Angetriebene können vernachlässigt werden)								Mittlere	Totale
	Total [Anzahl]	Benzin [Anzahl]	Diesel [Anzahl]	Dieselanteil [%- Anteil]	Benzin min max		Diesel min max		[1000km/Jahr]	[1000km/Jahr]
LKW total	40302	10470	29832	74%						
LKW (<3.5t)	24149	8970	15179	63%	15	20	12	14	30,8	743789
LKW (zw. 3.5 u. 14.99t))	9179	1500	7679	84%	28	35	31	35	50,3	461704
LKW (>15t)	6974	0	6974	100%	28	35	31	35	72,1	502825
Selbstf. Arbeitsmittel	9797	1964	7833	80%	15	30	12	35	30,8	301748
Total	90401	22904	67497							2010066

S-Gehalt in Benzin (g/kg) 0,25

S-Gehalt in Diesel (g/kg) 1,8

Einwohner in OÖ 1340000

Masse Benzin (kg/l) 0,726

Masse Diesel (kg/l) 0,84

Tabelle 2: Stofffluss (S) des oberösterreichischen Güterverkehrs berechnet aus Fahrzeugbestand, angenommenen mittleren Verbräuchen, mittlere Fahrleistungen und gewichteten Emissionskennzahl

Typ	Jährlicher Ressourcenverbrauch					
	Benzin (t/a)			Diesel (t/a)		
	min.	max.	Mittelw.	min.	max.	Mittelw.
LKW total	22712	29644	26178	139321	158184	148753
LKW (<3.5t)	15043	20058	17550	23563	27490	25526
LKW (zw. 3.5 u. 14.99t)	7669	9586	8627	50290	56779	53535
LKW (>15t)	0	0	0	65468	73915	69692
Selbstf. Arbeitsmittel	3294	6587	4941	12159	35465	23812
Total:	26006	36231	31118	151480	193649	172565

Tabelle 3: Schwefelstofffluss durch straßengebundenen Baumaterialientransport

	Schwefelfluss im Benzin (kg/a)				Schwefelfluss im Diesel (kg/a)				Stoffflüsse (S) gesamt	
	min.	max.	Mittelw.	%-Anteil	min.	max.	Mittelw.	%-Anteil	min.	max.
LKW total	5678	7411	6544	84%	250777	284732	267755	86%	256455	292143
LKW (<3.5t)	3761	5014	4388	56%	42413	49482	45947	15%	46174	54496
LKW (zw. 3.5 u. 14.99t))	1917	2396	2157	28%	90522	102203	96363	31%	92440	104599
LKW (>15t)	0	0	0	0%	117842	133048	125445	40%	117842	133048
Selbstf. Arbeitsmittel	823	1647	1235	16%	21887	63836	42862	14%	22710	65483
Total	6501	9058	7780	100%	272664	348568	310616	100%	279166	357626

Aufteilung des Lagers im Hochbau Oberösterreichs auf Baustoffe sowie Bestimmung von Schwefelgehalten											
Baustoff	Kategorie	Mio. Mg (D)	Anteil	Mio. Mg (OÖ)			kg/EW			S (kg/EW)	
				Min.	Durchschn.	Max.	Min.	Durchschn.	Max.	min	max
Asphaltdeckschicht	Asphalt	17.905	0,18%	0,170	0,357	0,777	127	267	580	0,15	2,03
Bitumen	Asphalt	2.288	0,02%	0,022	0,046	0,099	16	34	74	0,49	3,70
Bitumendichtungsbahn	Asphalt	21.571	0,22%	0,204	0,430	0,936	153	321	698	4,58	34,92
Beton (ohne Arm.-eisen)	Beton	37.289	0,37%	0,353	0,744	1,618	264	555	1.207	0,26	1,81
Beton pc100	Beton	1.459.523	14,56%	13.830	29.116	63.327	10.321	21.728	47.259	10,32	70,89
Beton pc150	Beton	3.318.597	33,10%	31.446	66.202	143.990	23.467	49.405	107.455	23,47	161,18
Beton pc300	Beton	4.160	0,04%	0,039	0,083	0,180	29	62	135	0,03	0,20
Betonfertigteile	Beton	0.789	0,01%	0,007	0,016	0,034	6	12	26	0,01	0,04
Betonpflasterstein	Beton	45.004	0,45%	0,426	0,898	1,953	318	670	1.457	0,32	2,19
Bimshohlblockstein	Beton	168.214	1,68%	1,594	3,356	7,299	1.190	2.504	5.447	1,19	8,17
Transportbeton	Beton	0.663	0,01%	0,006	0,013	0,029	5	10	21	0,00	0,03
Ytong, Porenbeton	Beton	48.950	0,49%	0,464	0,976	2,124	346	729	1.585	0,35	2,38
Alkydharzlack	Chem.Erz.	0.014	0,00%	0,000	0,000	0,001	0	0	0	0,00	0,00
Deckfarbe	Chem.Erz.	5.163	0,05%	0,049	0,103	0,224	37	77	167	0,05	0,62
Haftgrundkleber	Chem.Erz.	0.560	0,01%	0,005	0,011	0,024	4	8	18	0,01	0,07
Kunstharzputz	Chem.Erz.	16.328	0,16%	0,155	0,326	0,708	115	243	529	0,17	1,96
Rohöl	Chem.Erz.	1.035	0,01%	0,010	0,021	0,045	7	15	34	0,01	0,12
Keramik	Feinkeramik	5.519	0,06%	0,052	0,110	0,239	39	82	179	-	-
Glas beschichtet	Glas	16.150	0,16%	0,153	0,322	0,701	114	240	523	0,10	0,47
Glas unbeschichtet	Glas	0.482	0,00%	0,005	0,010	0,021	3	7	16	0,00	0,01
Glasfaser	Glas	0.431	0,00%	0,004	0,009	0,019	3	6	14	0,00	0,01
Glaswolle	Glas	0.057	0,00%	0,001	0,001	0,002	0	1	2	0,00	0,00
Schaumglas	Glas	0.065	0,00%	0,001	0,001	0,003	0	1	2	0,00	0,00
Brettschichtholz	Holz	17.086	0,17%	0,162	0,341	0,741	121	254	553	0,23	1,11
Harthaslerplatte	Holz	0.227	0,00%	0,002	0,005	0,010	2	3	7	0,00	0,01
Holz im Wald	Holz	1.830	0,02%	0,017	0,037	0,079	13	27	59	0,02	0,12
Holzbaustoff	Holz	0.498	0,00%	0,005	0,010	0,022	4	7	16	0,01	0,03
Holzfasersplatte	Holz	4.191	0,04%	0,040	0,084	0,182	30	62	136	0,06	0,27
Holzkohle	Holz	32.109	0,32%	0,304	0,641	1,393	227	478	1.040	0,43	2,08
Holzwohle	Holz	4.565	0,05%	0,043	0,091	0,198	32	68	148	0,06	0,30
Holzwohle-Leichtbauplatte	Holz	17.435	0,17%	0,165	0,348	0,756	123	260	565	0,23	1,13
Papier	Holz	3.024	0,03%	0,029	0,060	0,131	21	45	98	0,04	0,20
Papierflocken	Holz	0.512	0,01%	0,005	0,010	0,022	4	8	17	0,01	0,03
Schnittholz (Brett)	Holz	14.446	0,14%	0,137	0,288	0,627	102	215	468	0,19	0,94
Schnittholz (Kant)	Holz	174.872	1,74%	1,657	3,488	7,587	1.237	2.603	5.662	2,35	11,32
Spanplatte	Holz	8.185	0,08%	0,078	0,163	0,355	58	122	265	0,11	0,53
Weichfasersplatte	Holz	6.992	0,07%	0,066	0,139	0,303	49	104	226	0,09	0,45
Außenputz mineralisch	Kalk-Gips	44.307	0,44%	0,420	0,884	1,922	313	660	1.435	0,05	0,73
Dünnbetonmörtel	Kalk-Gips	0.024	0,00%	0,000	0,000	0,001	0	0	1	0,00	0,00
Dünnbetonmörtel	Kalk-Gips	316.112	3,15%	2,995	6,306	13,716	2.235	4,706	10,236	27,73	190,43
Gipskartonplatte	Kalk-Gips	11.191	0,11%	0,106	0,223	0,486	79	167	362	14,72	67,42
Gipsmörtel	Kalk-Gips	129.938	1,30%	1,231	2,592	5,638	919	1,934	4,207	170,95	782,76
Kalk-Maschinenputz	Kalk-Gips	0.651	0,01%	0,006	0,013	0,028	5	10	21	0,29	1,96
Lehmputz	Kalk-Gips	136.192	1,36%	1,291	2,717	5,909	963	2,028	4,410	0,15	2,25
Leichtmörtel	Kalk-Gips	1.532	0,02%	0,015	0,031	0,066	11	23	50	0,67	4,61
Zement-Maschinenputz	Kalk-Gips	112.809	1,13%	1,069	2,250	4,895	798	1,679	3,653	7,98	58,44
Kalksandstein	Kalksandstein	326.565	3,26%	3,094	6,515	14,169	2,309	4,862	10,574	0,37	5,39
Dampfbremse PE	Kunststoff	0.153	0,00%	0,001	0,003	0,007	1	2	5	0,00	0,02
Gummi	Kunststoff	0.653	0,01%	0,006	0,013	0,028	5	10	21	0,01	0,08
PE	Kunststoff	0.146	0,00%	0,001	0,003	0,006	1	2	5	0,00	0,02
PE-Dichtungsbahn	Kunststoff	0.944	0,01%	0,009	0,019	0,041	7	14	31	0,01	0,11
Polystyrol EPS	Kunststoff	1.261	0,01%	0,012	0,025	0,055	9	19	41	0,01	0,15
PUR-Hartschaum	Kunststoff	0.381	0,00%	0,004	0,008	0,017	3	6	12	0,00	0,05
PVC schlagfest	Kunststoff	30.789	0,31%	0,292	0,614	1,336	218	458	997	0,33	3,69
Vlies (PE)	Kunststoff	0.206	0,00%	0,002	0,004	0,009	1	3	7	0,00	0,02
Alu-Dichtungsbahn	Metalle	0.001	0,00%	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0,00	0,01
Alu-Konstruktion	Metalle	3.133	0,03%	0,030	0,062	0,136	22	47	101	4,12	23,84
Betonstahlmatte	Metalle	40.359	0,40%	0,382	0,805	1,751	285	601	1.307	0,06	0,65
Gußeisen	Metalle	0.484	0,00%	0,005	0,010	0,021	3	7	16	0,00	0,01
Kupfer	Metalle	0.347	0,00%	0,003	0,007	0,015	2	5	11	0,00	0,01
Roh Eisen	Metalle	0.432	0,00%	0,004	0,009	0,019	3	6	14	0,00	0,01
Stahl hochlegiert	Metalle	0.784	0,01%	0,007	0,016	0,034	6	12	25	0,00	0,01
Stahl niedriglegiert	Metalle	178.685	1,78%	1,693	3,565	7,753	1,264	2,660	5,786	0,25	2,89
Zink für Verzinkung	Metalle	0.790	0,01%	0,007	0,016	0,034	6	12	26	0,00	0,01
Bims	Natursteine	128.881	1,29%	1,221	2,571	5,592	911	1,919	4,173	0,15	2,13
Kalkstein	Natursteine	256.841	2,56%	2,434	5,124	11,144	1,816	3,824	8,316	0,29	4,24
Mineralwolle	Natursteine	17.870	0,18%	0,169	0,356	0,775	126	266	579	0,02	0,30
Schieferplatte	Natursteine	2.662	0,03%	0,025	0,053	0,116	19	40	86	0,00	0,04
Kies	Sand,Kies	232.750	2,32%	2,205	4,643	10,099	1,646	3,465	7,536	0,26	3,84
Kiesbruch	Sand,Kies	17.466	0,17%	0,166	0,348	0,758	124	260	566	0,02	0,29

Anhang 3a: Szenario 1: Lineare Bestandszuwachs auf Basis der Produktion 1997

Produkt	Produkt-Lebensdauer	Ausfallverhalten	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959
Anhydritestrich	30	6	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000
Gipsestrich	30	6	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000
Putzmörtel	35	4	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000	600.000	600.000	600.000	600.000	600.000
Gipskleber	40	2										
Ansetzbinder	40	2										
Vollgipsplatte	40	2										
Vollgipsverbundplatte	40	2										
Wärmedämmung												
Gipsfaserplatte	40	2										
Gipskartonplatte	40	2										
Gipskartonverbundplatte	40	2										
Wärmedämmung												
Modellformengips	5	10										
Keramikindustrie												
Modellformengips andere Industrie	1	10										
Medizinalgips	1	10	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Zement	90	3	471.615	471.615	471.615	471.615	471.615	831.710	831.710	831.710	831.710	831.710
Produkt	Produkt-Lebensdauer	Ausfallverhalten	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Anhydritestrich	30	6	300.000	300.000	350.000	350.000	350.000	350.000	350.000	400.000	400.000	400.000
Gipsestrich	30	6	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	105.000	126.563	126.563	126.563
Putzmörtel	35	4	700.000	700.000	700.000	700.000	700.000	700.000	700.000	843.750	843.750	843.750
Gipskleber	40	2	3.500	3.500	7.500	7.500	7.500	7.500	7.500	10.000	10.000	10.000
Ansetzbinder	40	2	0	0	0	0	0	0	0	24.000	24.000	24.000
Vollgipsplatte	40	2	70.000	70.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	180.000	180.000	180.000
Vollgipsverbundplatte	40	2								20.000	20.000	20.000
Wärmedämmung												
Gipsfaserplatte	40	2										
Gipskartonplatte	40	2								450.000	450.000	450.000
Gipskartonverbundplatte	40	2								30.000	30.000	30.000
Wärmedämmung												
Modellformengips	5	10	50.000	50.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	75.000	75.000	75.000
Keramikindustrie												
Modellformengips andere Industrie	1	10	50.000	50.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	75.000	75.000	75.000
Medizinalgips	1	10	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Zement	90	3	1.194.005	1.194.005	1.618.235	1.618.235	1.618.235	1.618.235	1.618.235	1.847.570	1.847.570	1.847.570

Produkt	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Anhydritestrich	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000	450.000	450.000	400.000	400.000	400.000	400.000	350.000
Gipsestrich	168.750	168.750	168.750	168.750	225.000	225.000	210.000	225.000	217.500	210.000	195.000	172.500
Putzmörtel	1.125.000	1.125.000	1.125.000	1.125.000	1.500.000	1.500.000	1.400.000	1.500.000	1.450.000	1.400.000	1.300.000	1.150.000
Gipskleber	10.000	10.000	10.000	10.000	12.500	12.500	15.000	15.000	12.500	12.500	15.000	17.500
Ansetzbinder	24.000	24.000	24.000	24.000	31.800	31.620	28.580	28.850	29.300	25.600	25.300	25.300
Vollgipsplatte	180.000	180.000	180.000	180.000	225.000	225.000	270.000	270.000	225.000	225.000	270.000	315.000
Vollgipsverbundplatte Wärmedämmung	20.000	20.000	20.000	20.000	25.000	25.000	30.000	30.000	25.000	25.000	30.000	35.000
Gipsfaserplatte												
Gipskartonplatte	450.000	450.000	450.000	450.000	600.000	600.000	550.000	550.000	550.000	500.000	500.000	500.000
Gipskartonverbundplatte Wärmedämmung	30.000	30.000	30.000	30.000	36.000	32.400	21.600	27.000	36.000	12.000	6.000	6.000
Modellformengips Keramikindustrie	85.000	85.000	85.000	85.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000
Modellformengips andere Industrie	85.000	85.000	85.000	85.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000
Medizinalgips	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Zement	1.590.100	1.590.100	1.590.100	1.590.100	1.626.000	1.463.300	1.354.900	1.385.600	1.308.500	1.140.400	1.218.550	1.159.200
Produkt	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	Gesamt		
Anhydritestrich	400.000	450.000	500.000	600.000	660.000	700.000	812.541	777.801	748.470	18.748.811		
Gipsestrich	199.605	209.790	226.065	259.350	280.000	300.000	384.797	360.052	346.161	7.702.382		
Putzmörtel	1.330.700	1.398.600	1.507.100	1.729.000	1.892.100	2.355.500	2.565.313	2.400.344	2.307.739	51.730.146		
Gipskleber	21.000	20.000	23.275	24.835	26.500	28.500	36.650	48.361	47.100	563.721		
Ansetzbinder	35.180	37.680	40.240	45.687	59.600	68.000	106.700	152.442	148.530	1.190.649		
Vollgipsplatte	378.000	360.000	419.000	447.000	477.000	513.000	586.400	707.820	706.500	9.879.720		
Vollgipsverbundplatte Wärmedämmung	42.000	40.000	46.500	49.700	53.000	57.000	146.600	259.400	235.500	1.394.700		
Gipsfaserplatte							733.000	1.556.400	1.413.000	3.702.400		
Gipskartonplatte	700.000	750.000	800.000	907.000	1.183.400	1.346.400	1.385.432	1.475.872	1.540.312	19.538.416		
Gipskartonverbundplatte Wärmedämmung	3.600	3.600	4.800	6.732	7.824	15.120	15.558	16.574	17.298	572.906		
Modellformengips Keramikindustrie	95.500	94.500	92.000	109.000	90.500	105.000	100.000	100.000	100.000	3.046.500		
Modellformengips andere Industrie	95.500	94.500	92.000	109.000	90.500	105.000	100.000	100.000	100.000	3.046.500		
Medizinalgips	8.000	8.000	8.000	9.000	9.000	12.000	10	10.000	10.000	386.010		
Zement	1.289.550	1.366.200	1.550.000	1.828.150	1.841.100	1.850.000	1.800.000	1.750.000	1.550.000	64.457.325		

Gipskleber und Ansetzbinder; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Zuwachs = 0,20 Mio. t p.a.

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnitt tl. Bestand
0	217.650	227.620	374.317	931.044	978.152	978.152	978.152	978.152	978.152	978.152	978.152	978.152	978.152	978.152	596.358
5	167.364	214.276	224.091	368.514	916.610	962.988	962.988	962.988	962.988	962.988	962.988	962.988	962.988	962.988	567.329
10	159.700	159.700	204.463	213.829	351.638	874.635	918.889	918.889	918.889	918.889	918.889	918.889	918.889	918.889	520.375
15	32.581	147.699	147.699	189.098	197.760	325.212	808.905	849.834	849.834	849.834	849.834	849.834	849.834	849.834	459.588
20	13.629	29.205	132.396	132.396	169.506	177.271	291.518	725.098	761.786	761.786	761.786	761.786	761.786	761.786	390.108
25	0	11.841	25.374	115.028	115.028	147.269	154.015	253.276	629.976	661.851	661.851	661.851	661.851	661.851	317.404
30	0	0	9.971	21.367	96.863	96.863	124.013	129.694	213.279	530.493	557.334	557.334	557.334	557.334	246.563
35		0	0	8.138	17.439	79.057	79.057	101.217	105.853	174.074	432.976	454.883	454.883	454.883	181.728
40			0	0	6.438	13.795	62.540	62.540	80.069	83.737	137.704	342.512	359.842	359.842	125.751
45				0	0	4.936	10.577	47.951	47.951	61.391	64.203	105.581	262.613	275.901	80.100
50					0	0	3.668	7.860	35.634	35.634	45.622	47.712	78.461	195.157	44.975
55						0	0	2.642	5.662	25.666	25.666	32.860	34.365	56.513	20.375
60							0	0	1.844	3.952	17.918	17.918	22.940	23.991	11.070
65								0	0	1.248	2.674	12.124	12.124	15.522	6.242
70									0	0	818	1.754	7.951	7.951	3.079
75										0	0	520	1.115	5.054	1.338
80											0	0	321	687	252
85												0	0	191	64
90													0	0	0
95														0	0
Summe	590.924	790.341	1.118.311	1.979.414	2.849.434	3.660.179	4.394.324	5.040.140	5.591.917	6.049.694	6.418.415	6.706.698	6.925.449	7.086.336	
Summe Abgänge	14.522	28.204	46.347	69.941	108.132	167.407	244.008	332.337	426.375	520.375	609.432	689.870	759.401	817.266	
Alters- durchschnitt	5,4	7,3	8,0	6,7	7,4	8,8	10,3	11,9	13,5	14,9	16,2	17,3	18,2	19,0	
% Abgänge an Zugängen	6,7%	12,4%	12,4%	7,5%	11,1%	17,1%	24,9%	34,0%	43,6%	53,2%	62,3%	70,5%	77,6%	83,6%	
% Zugänge an Bestand	36,8%	28,8%	33,5%	47,0%	34,3%	26,7%	22,3%	19,4%	17,5%	16,2%	15,2%	14,6%	14,1%	13,8%	
% Abgänge an Bestand	2,5%	3,6%	4,1%	3,5%	3,8%	4,6%	5,6%	6,6%	7,6%	8,6%	9,5%	10,3%	11,0%	11,5%	
Bestands- wachstum	52,4%	33,7%	41,5%	77,0%	44,0%	28,5%	20,1%	14,7%	10,9%	8,2%	6,1%	4,5%	3,3%	2,3%	

Gipsfaserplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; linearer Zuwachs = 1,41 Mio. t p.a.

Periode	Alter	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	0	6.528.400	7.065.000	7.065.000	7.065.000	7.065.000	7.065.000	7.065.000	7.065.000	7.065.000	7.065.000	7.065.000	7.065.000	4.823.650
5	0	0	6.427.187	6.955.467	6.955.467	6.955.467	6.955.467	6.955.467	6.955.467	6.955.467	6.955.467	6.955.467	6.955.467	4.601.759
10	0	0	0	6.132.864	6.636.953	6.636.953	6.636.953	6.636.953	6.636.953	6.636.953	6.636.953	6.636.953	6.636.953	4.230.606
15	0	0	0	0	5.671.972	6.138.178	6.138.178	6.138.178	6.138.178	6.138.178	6.138.178	6.138.178	6.138.178	3.741.479
20	0	0	0	0	0	5.084.323	5.502.228	5.502.228	5.502.228	5.502.228	5.502.228	5.502.228	5.502.228	3.174.807
25			0	0	0	0	4.417.336	4.780.418	4.780.418	4.780.418	4.780.418	4.780.418	4.780.418	2.574.493
30				0	0	0	0	3.719.770	4.025.516	4.025.516	4.025.516	4.025.516	4.025.516	1.982.183
35					0	0	0	0	3.035.988	3.285.530	3.285.530	3.285.530	3.285.530	1.432.509
40						0	0	0	0	2.401.664	2.599.068	2.599.068	2.599.068	949.975
45							0	0	0	0	1.841.420	1.992.775	1.992.775	547.742
50								0	0	0	0	1.368.427	1.368.427	228.071
55									0	0	0	0	0	0
60										0	0	0	0	0
65											0	0	0	0
70												0	0	0
75													0	0
Summe	0	6.528.400	13.492.187	20.153.332	26.329.393	31.879.922	36.715.163	40.798.015	44.139.748	46.790.955	48.829.778	50.349.560		
Summe Abgänge	0	0	101.213	403.855	888.939	1.514.471	2.229.759	2.982.148	3.723.267	4.413.794	5.026.176	5.545.218		
% Zugänge an Bestand		100,0%	52,4%	35,1%	26,8%	22,2%	19,2%	17,3%	16,0%	15,1%	14,5%	14,0%		
% Abgänge an Bestand		0,0%	0,8%	2,0%	3,4%	4,8%	6,1%	7,3%	8,4%	9,4%	10,3%	11,0%		
Bestands-wachstum			106,7%	49,4%	30,6%	21,1%	15,2%	11,1%	8,2%	6,0%	4,4%	3,1%		

Vollgipsplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; linearer Zuwachs = 0,95 Mio. t p.a.

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnitt tl. Bestand
0	1.350.000	1.720.000	2.462.200	4.526.220	4.710.000	4.710.000	4.710.000	4.710.000	4.710.000	4.710.000	4.710.000	4.710.000	4.710.000	4.710.000	3.012.921
5	984.496	1.329.070	1.693.334	2.424.027	4.456.047	4.636.978	4.636.978	4.636.978	4.636.978	4.636.978	4.636.978	4.636.978	4.636.978	4.636.978	2.878.275
10	939.413	939.413	1.268.208	1.615.790	2.313.023	4.251.990	4.424.636	4.424.636	4.424.636	4.424.636	4.424.636	4.424.636	4.424.636	4.424.636	2.653.238
15	651.611	868.815	868.815	1.172.900	1.494.362	2.139.196	3.932.448	4.092.119	4.092.119	4.092.119	4.092.119	4.092.119	4.092.119	4.092.119	2.357.474
20	272.580	584.101	778.801	778.801	1.051.381	1.339.537	1.917.563	3.525.024	3.668.152	3.668.152	3.668.152	3.668.152	3.668.152	3.668.152	2.016.044
25	0	236.822	507.475	676.634	676.634	913.456	1.163.810	1.666.008	3.062.594	3.186.945	3.186.945	3.186.945	3.186.945	3.186.945	1.655.877
30	0	0	199.424	427.337	569.783	569.783	769.207	980.026	1.402.919	2.578.962	2.683.677	2.683.677	2.683.677	2.683.677	1.302.296
35		0	0	162.765	348.782	465.043	465.043	627.808	799.874	1.145.029	2.104.888	2.190.353	2.190.353	2.190.353	976.176
40			0	0	128.758	275.910	367.879	367.879	496.637	632.753	905.793	1.665.103	1.732.712	1.732.712	692.178
45				0	0	98.722	211.547	282.063	282.063	380.785	485.148	694.495	1.276.679	1.328.517	458.184
50					0	0	73.364	157.209	209.611	209.611	282.975	360.532	516.105	948.747	275.815
55						0	0	52.842	113.233	150.977	150.977	203.820	259.681	371.737	144.807
60							0	0	36.890	79.049	105.399	105.399	142.289	181.287	81.289
65								0	0	24.961	53.488	71.317	71.317	96.278	45.337
70									0	0	16.370	35.078	46.771	46.771	24.165
75										0	0	10.405	22.297	29.729	12.486
80											0	0	6.410	13.737	5.037
85												0	0	3.828	1.276
90													0	0	0
95														0	0
Summe	4.198.101	5.678.221	7.778.257	11.784.475	15.748.770	19.400.616	22.672.476	25.522.592	27.935.706	29.920.958	31.507.545	32.739.009	33.667.121	34.342.374	
Summe Abgänge	145.040	239.880	362.164	520.002	745.705	1.058.155	1.438.140	1.859.884	2.296.886	2.724.748	3.123.413	3.478.536	3.781.888	4.034.748	
Alters- durchschnitt	7,0	8,2	8,8	8,2	8,9	10,1	11,5	12,9	14,3	15,6	16,7	17,7	18,5	19,2	
% Abgänge an Zugängen	10,7%	13,9%	14,7%	11,5%	15,8%	22,5%	30,5%	39,5%	48,8%	57,9%	66,3%	73,9%	80,3%	85,7%	
% Zugänge an Bestand	32,2%	30,3%	31,7%	38,4%	29,9%	24,3%	20,8%	18,5%	16,9%	15,7%	14,9%	14,4%	14,0%	13,7%	
% Abgänge an Bestand	3,5%	4,2%	4,7%	4,4%	4,7%	5,5%	6,3%	7,3%	8,2%	9,1%	9,9%	10,6%	11,2%	11,7%	
Bestands- wachstum	40,3%	35,3%	37,0%	51,5%	33,6%	23,2%	16,9%	12,6%	9,5%	7,1%	5,3%	3,9%	2,8%	2,0%	

Gipskartonplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; linearer Zuwachs = 1,56 Mio. t p.a.

Periode	Alter	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0		3.003.000	2.832.400	5.024.876	7.566.265	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	7.788.048	6.319.189
5		2.362.791	2.956.443	2.788.488	4.946.973	7.448.961	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	7.667.306	6.124.813
10		2.254.591	2.254.591	2.821.057	2.660.794	4.720.434	7.107.848	7.316.194	7.316.194	7.316.194	7.316.194	7.316.194	7.316.194	7.316.194	7.316.194	5.739.205
15			2.085.156	2.085.156	2.609.052	2.460.832	4.365.688	6.573.685	6.766.373	6.766.373	6.766.373	6.766.373	6.766.373	6.766.373	6.766.373	5.195.706
20				1.869.122	1.869.122	2.338.739	2.205.875	3.913.377	5.892.613	6.065.338	6.065.338	6.065.338	6.065.338	6.065.338	6.065.338	4.540.073
25					1.623.921	1.623.921	2.031.931	1.916.498	3.400.001	5.119.591	5.269.657	5.269.657	5.269.657	5.269.657	5.269.657	3.824.014
30						1.367.479	1.367.479	1.711.058	1.613.853	2.863.088	4.311.128	4.437.496	4.437.496	4.437.496	4.437.496	3.098.407
35							1.116.104	1.116.104	1.396.525	1.317.188	2.336.784	3.518.640	3.621.779	3.621.779	3.621.779	2.407.409
40								882.911	882.911	1.104.742	1.041.982	1.848.549	2.783.473	2.865.063	2.865.063	1.784.337
45									676.951	676.951	847.035	798.915	1.417.331	2.134.163	2.196.720	1.249.724
50										503.067	503.067	629.463	593.703	1.053.271	1.585.975	811.425
55											362.346	362.346	453.385	427.628	758.643	472.870
60												252.958	252.958	316.514	298.533	280.241
65													171.160	171.160	214.164	185.495
70														112.249	112.249	112.249
75															71.350	71.350
Summe		7.620.383	10.128.590	14.588.699	21.276.126	27.748.414	33.650.279	38.885.180	43.400.775	47.187.887	50.275.258	52.721.283	54.433.042	55.728.830	56.637.125	
Summe Abgänge		145.409	324.193	564.767	878.838	1.315.760	1.886.183	2.553.147	3.272.453	4.000.936	4.700.677	5.342.024	6.076.289	6.492.260	6.879.754	
Altersdurchschnitt		4,5	6,8	7,6	7,9	9,0	10,4	11,9	13,3	14,7	16,0	17,0	18,0	18,9	19,5	
% Abgänge an Zugängen		4,8%	11,4%	11,2%	11,6%	16,9%	24,2%	32,8%	42,0%	51,4%	60,4%	68,6%	78,0%	83,4%	88,3%	
% Zugänge an Bestand		39,4%	28,0%	34,4%	35,6%	28,1%	23,1%	20,0%	17,9%	16,5%	15,5%	14,8%	14,3%	14,0%	13,8%	
% Abgänge an Bestand		1,9%	3,2%	3,9%	4,1%	4,7%	5,6%	6,6%	7,5%	8,5%	9,3%	10,1%	11,2%	11,6%	12,1%	
Bestandszuwachs		60,0%	32,9%	44,0%	45,8%	30,4%	21,3%	15,6%	11,6%	8,7%	6,5%	4,9%	3,2%	2,4%	1,6%	

Gips- und Anhydritestrich; Weibull-Verteilung T=30, Alpha = 6; linearer Zuwachs = 1,09 Mio. t p.a.

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2044-2049	Durchschnitt tl. Bestand
0	3.202.500	2.857.105	4.185.205	5.619.082	5.473.152	5.473.152	5.473.152	5.473.152	5.473.152	5.473.152	5.473.152	5.473.152	5.473.152	5.473.152	4.168.599
5	2.843.689	3.202.431	2.857.044	4.185.115	5.618.961	5.473.035	5.473.035	5.473.035	5.473.035	5.473.035	5.473.035	5.473.035	5.473.035	5.473.035	4.099.850
10	2.629.203	2.839.852	3.198.110	2.853.188	4.179.468	5.611.379	5.465.649	5.465.649	5.465.649	5.465.649	5.465.649	5.465.649	5.465.649	5.465.649	4.018.133
15	2.239.729	2.591.995	2.799.662	3.152.850	2.812.810	4.120.319	5.531.966	5.388.299	5.388.299	5.388.299	5.388.299	5.388.299	5.388.299	5.388.299	3.877.324
20	1.854.802	2.083.790	2.411.529	2.604.738	2.933.336	2.616.971	3.833.446	5.146.808	5.013.144	5.013.144	5.013.144	5.013.144	5.013.144	5.013.144	3.519.509
25	1.216.199	1.448.707	1.627.560	1.883.543	2.034.450	2.291.104	2.044.005	2.994.142	4.019.953	3.915.554	3.915.554	3.915.554	3.915.554	3.915.554	2.671.164
30	478.243	625.395	744.956	836.926	968.558	1.046.157	1.178.134	1.051.070	1.539.651	2.067.145	2.013.460	2.013.460	2.013.460	2.013.460	1.327.862
35		104.428	136.559	162.666	182.748	211.491	228.435	257.253	229.508	336.193	451.374	439.652	439.652	439.652	278.432
40			4.718	6.170	7.350	8.257	9.556	10.321	11.624	10.370	15.190	20.395	19.865	19.865	11.973
45				15	19	23	26	30	32	36	32	47	64	62	35
50					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60							0	0	0	0	0	0	0	0	0
65								0	0	0	0	0	0	0	0
70									0	0	0	0	0	0	0
75										0	0	0	0	0	0
80											0	0	0	0	0
85												0	0	0	0
90													0	0	0
95														0	0
Summe	14.464.366	15.753.703	17.965.343	21.304.293	24.210.851	26.851.888	29.237.403	31.259.759	32.614.046	33.142.575	33.208.889	33.202.386	33.201.873	33.201.871	
Summe Abgänge	967.279	1.567.768	1.973.565	2.280.132	2.566.594	2.832.116	3.087.636	3.450.796	4.118.865	4.944.623	5.406.838	5.479.655	5.473.665	5.473.154	
Alters- durchschnitt	10,8	11,7	11,4	10,7	10,6	10,9	11,5	12,2	12,8	13,1	13,2	13,2	13,2	13,2	
% Abgänge an Zugängen	30,2%	54,9%	47,2%	40,6%	46,9%	51,7%	56,4%	63,0%	75,3%	90,3%	98,8%	100,1%	100,0%	100,0%	
% Zugänge an Bestand	22,1%	18,1%	23,3%	26,4%	22,6%	20,4%	18,7%	17,5%	16,8%	16,5%	16,5%	16,5%	16,5%	16,5%	
% Abgänge an Bestand	6,7%	10,0%	11,0%	10,7%	10,6%	10,5%	10,6%	11,0%	12,6%	14,9%	16,3%	16,5%	16,5%	16,5%	
Bestands- wachstum	18,3%	8,9%	14,0%	18,6%	13,6%	10,9%	8,9%	6,9%	4,3%	1,6%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	

Gipsmörtel; Weibull-Verteilung T=35, Alpha = 4; linearer Zuwachs = 2,31 Mio. t p.a.

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnitt l. Bestand
0	7.350.000	6.380.700	8.882.300	11.888.874	11.538.696	11.538.696	11.538.696	11.538.696	11.538.696	11.538.696	11.538.696	11.538.696	11.538.696	11.538.696	8.586.629
5	5.622.658	7.346.939	6.378.043	8.878.601	11.883.924	11.533.891	11.533.891	11.533.891	11.533.891	11.533.891	11.533.891	11.533.891	11.533.891	11.533.891	8.427.746
10	4.190.730	5.587.640	7.301.183	6.338.321	8.823.306	11.809.911	11.462.059	11.462.059	11.462.059	11.462.059	11.462.059	11.462.059	11.462.059	11.462.059	8.203.770
15	3.383.894	4.078.800	5.438.401	7.106.177	6.169.032	8.587.645	11.494.482	11.155.920	11.155.920	11.155.920	11.155.920	11.155.920	11.155.920	11.155.920	7.798.112
20	3.146.028	3.146.028	3.792.087	5.056.117	6.606.659	5.735.389	7.983.990	10.686.495	10.371.731	10.371.731	10.371.731	10.371.731	10.371.731	10.371.731	7.054.844
25	2.312.442	2.697.849	2.697.849	3.251.871	4.335.829	5.665.483	4.918.333	6.846.601	9.164.110	8.894.188	8.894.188	8.894.188	8.894.188	8.894.188	5.860.196
30	1.165.759	1.748.638	2.040.078	2.040.078	2.459.022	3.278.696	4.284.163	3.719.178	5.177.309	6.929.779	6.725.667	6.725.667	6.725.667	6.725.667	4.267.526
35		735.759	1.103.638	1.287.578	1.287.578	1.551.991	2.069.322	2.703.914	2.347.328	3.267.616	4.373.672	4.244.849	4.244.849	4.244.849	2.574.073
40			363.197	544.796	635.596	635.596	766.120	1.021.493	1.334.751	1.158.727	1.613.014	2.159.004	2.095.412	2.095.412	1.201.927
45				130.098	195.148	227.672	227.672	274.426	365.902	478.112	415.059	577.786	773.362	750.583	401.438
50					31.062	46.592	54.358	54.358	65.520	87.361	114.151	99.097	137.949	184.644	87.509
55						4.495	6.743	7.867	7.867	9.482	12.643	16.520	14.341	19.964	11.103
60							355	533	621	621	749	999	1.305	1.133	789
65								14	20	24	24	29	38	50	28
70									0	0	0	0	0	1	0
75										0	0	0	0	0	0
80											0	0	0	0	0
85												0	0	0	0
90													0	0	0
95														0	0
Summe	27.171.510	31.722.354	37.996.777	46.522.512	53.965.849	60.616.058	66.340.182	71.005.442	74.525.726	76.888.206	78.211.465	78.780.436	78.949.408	78.978.786	
Summe Abgänge	1.119.354	1.829.856	2.607.877	3.363.139	4.095.358	4.888.487	5.814.571	6.873.435	8.018.412	9.176.216	10.215.436	10.969.724	11.369.723	11.509.317	
Alters- durchschnitt	10,2	11,4	11,7	11,4	11,8	12,4	13,1	13,9	14,6	15,1	15,5	15,7	15,8	15,8	
% Abgänge an Zugängen	15,2%	28,7%	29,4%	28,3%	35,5%	42,4%	50,4%	59,6%	69,5%	79,5%	88,5%	95,1%	98,5%	99,7%	
% Zugänge an Bestand	27,1%	20,1%	23,4%	25,6%	21,4%	19,0%	17,4%	16,3%	15,5%	15,0%	14,8%	14,6%	14,6%	14,6%	
% Abgänge an Bestand	4,1%	5,8%	6,9%	7,2%	7,6%	8,1%	8,8%	9,7%	10,8%	11,9%	13,1%	13,9%	14,4%	14,6%	
Bestands- wachstum	29,8%	16,7%	19,8%	22,4%	16,0%	12,3%	9,4%	7,0%	5,0%	3,2%	1,7%	0,7%	0,2%	0,0%	

Zement; Weibull-Verteilung T=90, Alpha = 3; linearer Zuwachs = 1,55 Mio. t p.a.

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049
0	7.138.300	6.017.400	8.435.450	8.200.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000
5	7.949.137	7.137.076	6.016.368	8.434.004	8.198.594	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671
10	9.225.187	7.939.601	7.128.515	6.009.151	8.423.887	8.188.759	7.739.376	7.739.376	7.739.376	7.739.376	7.739.376	7.739.376	7.739.376	7.739.376
15	8.053.802	9.195.181	7.913.777	7.105.329	5.989.606	8.396.487	8.162.125	7.714.203	7.714.203	7.714.203	7.714.203	7.714.203	7.714.203	7.714.203
20	5.904.868	8.002.868	9.137.029	7.863.729	7.060.393	5.951.726	8.343.386	8.110.506	7.665.417	7.665.417	7.665.417	7.665.417	7.665.417	7.665.417
25	4.070.366	5.843.428	7.919.598	9.041.958	7.781.906	6.986.929	5.889.799	8.256.573	8.026.116	7.585.658	7.585.658	7.585.658	7.585.658	7.585.658
30	2.272.336	4.007.347	5.752.958	7.796.983	8.901.966	7.661.423	6.878.755	5.798.610	8.128.741	7.901.852	7.468.213	7.468.213	7.468.213	7.468.213
35		2.223.388	3.921.025	5.629.033	7.629.029	8.710.209	7.496.389	6.730.579	5.673.702	7.953.639	7.731.638	7.307.341	7.307.341	7.307.341
40			2.159.883	3.809.032	5.468.255	7.411.127	8.461.426	7.282.275	6.538.339	5.511.649	7.726.466	7.510.805	7.098.627	7.098.627
45				2.080.994	3.669.907	5.268.529	7.140.437	8.152.374	7.016.292	6.299.528	5.310.337	7.444.258	7.236.475	6.839.351
50					1.986.507	3.503.277	5.029.313	6.816.228	7.782.218	6.697.719	6.013.500	5.069.223	7.106.254	6.907.905
55						1.876.901	3.309.982	4.751.819	6.440.141	7.352.832	6.328.171	5.681.703	4.789.527	6.714.165
60							1.753.387	3.092.161	4.439.114	6.016.331	6.868.961	5.911.730	5.307.805	4.474.341
65								1.617.903	2.853.230	4.096.105	5.551.451	6.338.198	5.454.932	4.897.672
70									1.473.054	2.597.784	3.729.386	5.054.437	5.770.748	4.966.559
75										1.321.995	2.331.386	3.346.943	4.536.112	5.178.966
80											1.168.258	2.060.265	2.957.721	4.008.600
85												1.015.544	1.790.948	2.571.090
90													867.487	1.529.845
95														727.420
Summe	44.613.997	50.366.290	58.384.603	65.970.212	72.860.051	79.454.038	85.703.045	91.561.279	96.988.614	101.952.760	106.431.092	109.396.442	111.237.080	112.065.065
Summe Abgänge	154.837	265.107	417.138	614.391	860.161	1.156.012	1.500.994	1.891.766	2.322.664	2.785.854	3.271.668	4.784.649	5.909.362	6.922.015
Alters- durchschnitt	12,1	15,0	17,1	19,2	21,5	23,7	25,9	28,0	29,9	31,8	33,5	35,5	37,5	39,5
% Abgänge an Zugängen	2,2%	4,4%	4,9%	7,5%	11,1%	14,9%	19,4%	24,4%	30,0%	35,9%	42,2%	61,7%	76,2%	89,3%
% Zugänge an Bestand	16,0%	11,9%	14,4%	12,4%	10,6%	9,8%	9,0%	8,5%	8,0%	7,6%	7,3%	7,1%	7,0%	6,9%
% Abgänge an Bestand	0,3%	0,5%	0,7%	0,9%	1,2%	1,5%	1,8%	2,1%	2,4%	2,7%	3,1%	4,4%	5,3%	6,2%
Bestands- wachstum	18,6%	12,9%	15,9%	13,0%	10,4%	9,1%	7,9%	6,8%	5,9%	5,1%	4,4%	2,8%	1,7%	0,7%

Anhang 3b: Szenario 2: Substitution durch andere Baustoffe, leichtere Bauweise sowie Umstieg auf Gipsprodukte mit geringeren Dispersionsgraden

Prognose des Verbrauchs an Gipsprodukten 2000-2050 bei Substitution durch andere Baustoffe (jährlich +0,5 %), leichtere Bauweise (Rückgang um 0,001 t/m² Wohn-/Nutzfläche p.a.) sowie Umstieg auf Gipsprodukte mit geringeren Dispersionsgraden													
	Lebens- dauer	Ausfall- verhalte	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anhydritestrich	30	6	700.000	625.000	550.000	500.000	450.000	475.000	500.000	475.000	450.000	425.000	400.000
Gipsestrich	30	6	300.000	275.000	250.000	225.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
Putzmörtel	35	4	2.100.000	2.000.000	1.900.000	1.825.000	1.750.000	1.775.000	1.800.000	1.775.000	1.750.000	1.725.000	1.700.000
Gipskleber	40	2	40.000	50.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000
Ansetzbinder	40	2	135.000	142.500	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000
Vollgipsplatte	40	2	600.000	900.000	1.200.000	1.250.000	1.300.000	1.300.000	1.300.000	1.300.000	1.300.000	1.275.000	1.250.000
Vollgipsverbundplatte Wärmedämmung	40	2	200.000	150.000	100.000	50.000	0	0	0	0	0	0	0
Gipsfaserplatte	40	2	1.300.000	650.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gipskartonplatte	40	2	1.400.000	1.550.000	1.700.000	1.750.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.775.000	1.750.000
Gipskartonverbundplatte Wärmedämmung	40	2	15.000	11.250	7.500	3.750	0	0	0	0	0	0	0
Modellformengips Keramikindustrie	5	10	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Modellformengips andere Industrie	1	10	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Medizinalgips	1	10	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Zement	90	3	1.500.000	1.450.000	1.400.000	1.375.000	1.350.000	1.375.000	1.400.000	1.385.000	1.370.000	1.335.000	1.300.000
Summe			8.500.000	8.013.750	7.527.500	7.398.750	7.270.000	7.345.000	7.420.000	7.355.000	7.290.000	7.155.000	7.020.000

[illegible]

Gipskleber und Ansetzbinder; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Substitutionsszenario

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	217.650	227.620	374.317	931.044	910.000	997.500	1.050.000	1.050.000	1.050.000	1.050.000	1.050.000	1.050.000	1.050.000	1.050.000	622.657
5	167.364	214.276	224.091	368.514	916.610	895.892	982.035	1.033.721	1.033.721	1.033.721	1.033.721	1.033.721	1.033.721	1.033.721	590.860
10	159.700	159.700	204.463	213.829	351.638	874.635	854.866	937.065	986.384	986.384	986.384	986.384	986.384	986.384	540.326
15	32.581	147.699	147.699	189.098	197.760	325.212	808.905	790.622	866.643	912.256	912.256	912.256	912.256	912.256	475.453
20	13.629	29.205	132.396	132.396	169.506	177.271	291.518	725.098	708.709	776.854	817.741	817.741	817.741	817.741	401.722
25	0	11.841	25.374	115.028	115.028	147.269	154.015	253.276	629.976	615.737	674.942	710.466	710.466	710.466	324.925
30	0	0	9.971	21.367	96.863	96.863	124.013	129.694	213.279	530.493	518.502	568.358	598.272	598.272	250.425
35		0	0	8.138	17.439	79.057	79.057	101.217	105.853	174.074	432.976	423.189	463.881	488.295	182.552
40			0	0	6.438	13.795	62.540	62.540	80.069	83.737	137.704	342.512	334.770	366.960	124.255
45				0	0	4.936	10.577	47.951	47.951	61.391	64.203	105.581	262.613	256.677	78.353
50					0	0	3.668	7.860	35.634	35.634	45.622	47.712	78.461	195.157	44.975
55						0	0	2.642	5.662	25.666	25.666	32.860	34.365	56.513	20.375
60							0	0	1.844	3.952	17.918	17.918	22.940	23.991	11.070
65								0	0	1.248	2.674	12.124	12.124	15.522	6.242
70									0	0	818	1.754	7.951	7.951	3.079
75										0	0	520	1.115	5.054	1.338
80											0	0	321	687	252
85												0	0	191	64
90													0	0	0
Summe	590.924	790.341	1.118.311	1.979.414	2.781.282	3.612.431	4.421.196	5.141.684	5.765.725	6.291.146	6.721.128	7.063.096	7.327.380	7.525.647	
Summe Abgänge	14.522	28.204	46.347	69.941	108.132	166.350	241.235	329.511	425.959	524.579	620.019	708.032	785.716	851.733	
% Abgänge an Zugängen	6,7%	12,4%	12,4%	7,5%	11,9%	16,7%	23,0%	31,4%	40,6%	50,0%	59,0%	67,4%	74,8%	81,1%	
% Zugänge an Bestand	36,8%	28,8%	33,5%	47,0%	32,7%	27,6%	23,7%	20,4%	18,2%	16,7%	15,6%	14,9%	14,3%	14,0%	
% Abgänge an Bestand	2,5%	3,6%	4,1%	3,5%	3,9%	4,6%	5,5%	6,4%	7,4%	8,3%	9,2%	10,0%	10,7%	11,3%	
Bestands- wachstum	52,4%	33,7%	41,5%	77,0%	40,5%	29,9%	22,4%	16,3%	12,1%	9,1%	6,8%	5,1%	3,7%	2,7%	

Gipsfaserplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Substitutionsszenario

Periode Alter	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	0	6.528.400	5.200.000	1.950.000	0	0	0	0	0	0	0	0	854.900
5	0	0	6.427.187	5.119.381	1.919.768	0	0	0	0	0	0	0	897.756
10	0	0	0	6.132.864	4.884.948	1.831.855	0	0	0	0	0	0	917.833
15	0	0	0	0	5.671.972	4.517.838	1.694.189	0	0	0	0	0	914.154
20	0	0	0	0	0	5.084.323	4.049.764	1.518.662	0	0	0	0	887.729
25		0	0	0	0	0	4.417.336	3.518.496	1.319.436	0	0	0	841.388
30			0	0	0	0	0	3.719.770	2.962.871	1.111.077	0	0	779.372
35				0	0	0	0	0	3.035.988	2.418.225	906.834	0	706.783
40					0	0	0	0	0	2.401.664	1.912.973	717.365	629.000
45						0	0	0	0	0	1.841.420	1.466.727	472.592
50							0	0	0	0	0	1.368.427	228.071
55								0	0	0	0	0	0
60									0	0	0	0	0
65										0	0	0	0
70											0	0	0
75												0	0
Summe	0	6.528.400	11.627.187	13.202.246	12.476.688	11.434.017	10.161.290	8.756.928	7.318.295	5.930.965	4.661.227	3.552.519	
Summe Abgänge	0	0	101.213	374.941	725.558	1.042.671	1.272.727	1.404.362	1.438.633	1.387.329	1.269.738	1.108.708	
Alters- durchschnitt		0,0	2,8	6,6	11,5	16,4	21,3	26,3	31,2	36,1	41,0	45,9	
% Abgänge an Zugängen		0,0%	1,9%	19,2%									
% Zugänge an Bestand		100,0%	44,7%	14,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
% Abgänge an Bestand		0,0%	0,9%	2,8%	5,8%	9,1%	12,5%	16,0%	19,7%	23,4%	27,2%	31,2%	

Vollgipsplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Substitutionsszenario

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	1.350.000	1.720.000	2.462.200	4.526.220	4.500.000	5.750.000	6.500.000	6.500.000	6.500.000	6.500.000	6.500.000	6.500.000	6.450.000	6.325.000	3.759.171
5	984.496	1.329.070	1.693.334	2.424.027	4.456.047	4.430.234	5.660.855	6.399.227	6.399.227	6.399.227	6.399.227	6.399.227	6.399.227	6.350.002	3.567.940
10	939.413	939.413	1.268.208	1.615.790	2.313.023	4.251.990	4.227.359	5.401.625	6.106.185	6.106.185	6.106.185	6.106.185	6.106.185	6.106.185	3.257.071
15	651.611	868.815	868.815	1.172.900	1.494.362	2.139.196	3.932.448	3.909.668	4.995.687	5.647.298	5.647.298	5.647.298	5.647.298	5.647.298	2.857.299
20	272.580	584.101	778.801	778.801	1.051.381	1.339.537	1.917.563	3.525.024	3.504.604	4.478.105	5.062.205	5.062.205	5.062.205	5.062.205	2.404.957
25	0	236.822	507.475	676.634	676.634	913.456	1.163.810	1.666.008	3.062.594	3.044.852	3.890.645	4.398.120	4.398.120	4.398.120	1.935.553
30	0	0	199.424	427.337	569.783	569.783	769.207	980.026	1.402.919	2.578.962	2.564.023	3.276.251	3.703.588	3.703.588	1.481.778
35		0	0	162.765	348.782	465.043	465.043	627.808	799.874	1.145.029	2.104.888	2.092.694	2.673.998	3.022.781	1.069.901
40			0	0	128.758	275.910	367.879	367.879	496.637	632.753	905.793	1.665.103	1.655.457	2.115.307	717.623
45				0	0	98.722	211.547	282.063	282.063	380.785	485.148	694.495	1.276.679	1.269.283	452.799
50					0	0	73.364	157.209	209.611	209.611	282.975	360.532	516.105	948.747	275.815
55						0	0	52.842	113.233	150.977	150.977	203.820	259.681	371.737	144.807
60							0	0	36.890	79.049	105.399	105.399	142.289	181.287	81.289
65								0	0	24.961	53.488	71.317	71.317	96.278	45.337
70									0	0	16.370	35.078	46.771	46.771	24.165
75										0	0	10.405	22.297	29.729	12.486
80											0	0	6.410	13.737	5.037
85												0	0	3.828	1.276
90													0	0	0
Summe	4.198.101	5.678.221	7.778.257	11.784.475	15.538.770	20.233.871	25.289.076	29.869.379	33.909.523	37.377.795	40.274.620	42.628.129	44.437.628	45.688.054	
Summe Abgänge	145.040	239.880	362.164	520.002	745.705	1.054.899	1.444.796	1.919.696	2.459.856	3.031.729	3.603.175	4.146.491	4.640.501	5.074.574	
Alters- durchschnitt	7,0	8,2	8,8	8,2	9,0	9,6	10,4	11,6	12,9	14,1	15,4	16,5	17,5	18,4	
% Abgänge an Zugängen	10,7%	13,9%	14,7%	11,5%	16,6%	18,3%	22,2%	29,5%	37,8%	46,6%	55,4%	63,8%	71,9%	80,2%	
% Zugänge an Bestand	32,2%	30,3%	31,7%	38,4%	29,0%	28,4%	25,7%	21,8%	19,2%	17,4%	16,1%	15,2%	14,5%	13,8%	
% Abgänge an Bestand	3,5%	4,2%	4,7%	4,4%	4,8%	5,2%	5,7%	6,4%	7,3%	8,1%	8,9%	9,7%	10,4%	11,1%	
Bestands- wachstum	40,3%	35,3%	37,0%	51,5%	31,9%	30,2%	25,0%	18,1%	13,5%	10,2%	7,8%	5,8%	4,2%	2,8%	

Gipskartonplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Substitutionsszenario

Periode Alter	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	3.003.000	2.832.400	5.024.876	7.566.265	7.367.500	8.098.750	8.630.000	8.861.250	9.000.000	9.000.000	9.000.000	9.000.000	8.950.000	8.825.000	6.872.440
5	2.362.791	2.956.443	2.788.488	4.946.973	7.448.961	7.253.277	7.973.191	8.496.204	8.723.869	8.860.468	8.860.468	8.860.468	8.860.468	8.811.243	6.637.740
10	2.254.591	2.254.591	2.821.057	2.660.794	4.720.434	7.107.848	6.921.126	7.608.072	8.107.135	8.324.374	8.454.718	8.454.718	8.454.718	8.454.718	6.185.635
15		2.085.156	2.085.156	2.609.052	2.460.832	4.365.688	6.573.685	6.400.995	7.036.316	7.497.874	7.698.787	7.819.336	7.819.336	7.819.336	5.559.350
20			1.869.122	1.869.122	2.338.739	2.205.875	3.913.377	5.892.613	5.737.815	6.307.313	6.721.051	6.901.148	7.009.207	7.009.207	4.814.549
25				1.623.921	1.623.921	2.031.931	1.916.498	3.400.001	5.119.591	4.985.100	5.479.888	5.839.350	5.995.822	6.089.705	4.009.612
30					1.367.479	1.367.479	1.711.058	1.613.853	2.863.088	4.311.128	4.197.875	4.614.529	4.917.226	5.048.988	3.201.270
35						1.116.104	1.116.104	1.396.525	1.317.188	2.336.784	3.518.640	3.426.206	3.766.269	4.013.323	2.445.238
40							882.911	882.911	1.104.742	1.041.982	1.848.549	2.783.473	2.710.352	2.979.364	1.779.285
45								676.951	676.951	847.035	798.915	1.417.331	2.134.163	2.078.099	1.232.778
50									503.067	503.067	629.463	593.703	1.053.271	1.585.975	811.425
55										362.346	362.346	453.385	427.628	758.643	472.870
60											252.958	252.958	316.514	298.533	280.241
65												171.160	171.160	214.164	185.495
70													112.249	112.249	112.249
75														71.350	71.350
Summe	7.620.383	10.128.590	14.588.699	21.276.126	27.327.866	33.546.953	39.637.949	45.229.374	50.189.762	54.377.471	57.823.658	60.416.605	62.414.972	63.772.132	
Summe Abgänge	145.409	324.193	564.767	878.838	1.315.760	1.879.663	2.539.004	3.269.824	4.039.612	4.812.292	5.553.813	6.407.052	6.951.633	7.467.840	
Alters- durchschnitt	4,5	6,8	7,6	7,9	9,1	10,4	11,6	12,8	14,0	15,2	16,3	17,3	18,2	19,0	
% Abgänge an Zugängen	4,8%	11,4%	11,2%	11,6%	17,9%	23,2%	29,4%	36,9%	44,9%	53,5%	61,7%	71,2%	77,7%	84,6%	
% Zugänge an Bestand	39,4%	28,0%	34,4%	35,6%	27,0%	24,1%	21,8%	19,6%	17,9%	16,6%	15,6%	14,9%	14,3%	13,8%	
Bestands- wachstum	60,0%	32,9%	44,0%	45,8%	28,4%	22,8%	18,2%	14,1%	11,0%	8,3%	6,3%	4,5%	3,3%	2,2%	

Gips- und Anhydritestrich; Weibull-Verteilung T=30, Alpha = 6; Substitutionsszenario

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	3.202.500	2.857.105	4.185.205	5.619.082	4.800.000	4.300.000	3.850.000	3.475.000	3.300.000	3.425.000	3.450.000	3.325.000	3.200.000	3.075.000	3.242.023
5	2.843.689	3.202.431	2.857.044	4.185.115	5.618.961	4.799.897	4.299.908	3.849.917	3.474.926	3.299.929	3.424.927	3.449.926	3.324.929	3.199.931	3.250.744
10	2.629.203	2.839.852	3.198.110	2.853.188	4.179.468	5.611.379	4.793.420	4.294.106	3.844.722	3.470.236	3.295.476	3.420.305	3.445.271	3.320.442	3.249.176
15	2.239.729	2.591.995	2.799.662	3.152.850	2.812.810	4.120.319	5.531.966	4.725.583	4.233.335	3.790.311	3.421.125	3.248.838	3.371.900	3.396.513	3.199.061
20	1.854.802	2.083.790	2.411.529	2.604.738	2.933.336	2.616.971	3.833.446	5.146.808	4.396.569	3.938.593	3.526.415	3.182.933	3.022.641	3.137.135	2.964.848
25	1.216.199	1.448.707	1.627.560	1.883.543	2.034.450	2.291.104	2.044.005	2.994.142	4.019.953	3.433.973	3.076.268	2.754.333	2.486.053	2.360.857	2.306.745
30	478.243	625.395	744.956	836.926	968.558	1.046.157	1.178.134	1.051.070	1.539.651	2.067.145	1.765.821	1.581.882	1.416.336	1.278.381	1.184.190
35		104.428	136.559	162.666	182.748	211.491	228.435	257.253	229.508	336.193	451.374	385.579	345.414	309.266	256.993
40			4.718	6.170	7.350	8.257	9.556	10.321	11.624	10.370	15.190	20.395	17.422	15.607	11.415
45				15	19	23	26	30	32	36	32	47	64	54	34
50					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60							0	0	0	0	0	0	0	0	0
65								0	0	0	0	0	0	0	0
70									0	0	0	0	0	0	0
75										0	0	0	0	0	0
80											0	0	0	0	0
85												0	0	0	0
90													0	0	0
Summe	14.464.366	15.753.703	17.965.343	21.304.293	23.537.699	25.005.598	25.768.895	25.804.230	25.050.319	23.771.786	22.426.629	21.369.237	20.630.029	20.093.186	
Summe Abgänge	967.279	1.567.768	1.973.565	2.280.132	2.566.594	2.832.101	3.086.703	3.439.665	4.053.911	4.703.533	4.795.158	4.382.392	3.939.207	3.611.843	
Alters- durchschnitt	10,8	11,7	11,4	10,7	10,9	11,6	12,6	13,6	14,5	14,6	14,2	13,8	13,6	13,5	
% Abgänge an Zugängen	30,2%	54,9%	47,2%	40,6%	53,5%	65,9%	80,2%	99,0%	122,8%	137,3%	139,0%	131,8%	123,1%	117,5%	
% Zugänge an Bestand	22,1%	18,1%	23,3%	26,4%	20,4%	17,2%	14,9%	13,5%	13,2%	14,4%	15,4%	15,6%	15,5%	15,3%	
% Abgänge an Bestand	6,7%	10,0%	11,0%	10,7%	10,9%	11,3%	12,0%	13,3%	16,2%	19,8%	21,4%	20,5%	19,1%	18,0%	
Bestands- wachstum	18,3%	8,9%	14,0%	18,6%	10,5%	6,2%	3,1%	0,1%	-2,9%	-5,1%	-5,7%	-4,7%	-3,5%	-2,6%	

Gipsmörtel; Weibull-Verteilung T=35, Alpha = 4; Substitutionsszenario

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	7.350.000	6.380.700	8.882.300	11.888.874	10.300.000	9.800.000	9.350.000	8.975.000	8.800.000	8.925.000	8.950.000	8.825.000	8.700.000	8.575.000	7.377.281
5	5.622.658	7.346.939	6.378.043	8.878.601	11.883.924	10.295.711	9.795.919	9.346.107	8.971.263	8.796.336	8.921.284	8.946.273	8.821.325	8.696.377	7.311.198
10	4.190.730	5.587.640	7.301.183	6.338.321	8.823.306	11.809.911	10.231.590	9.734.911	9.287.900	8.915.390	8.741.553	8.865.723	8.890.556	8.766.387	7.189.189
15	3.383.894	4.078.800	5.438.401	7.106.177	6.169.032	8.587.645	11.494.482	9.958.316	9.474.902	9.039.830	8.677.270	8.508.076	8.628.929	8.653.100	6.906.875
20	3.146.028	3.146.028	3.792.087	5.056.117	6.606.659	5.735.389	7.983.990	10.686.495	9.258.311	8.808.879	8.404.389	8.067.315	7.910.013	8.022.372	6.319.900
25	2.312.442	2.697.849	2.697.849	3.251.871	4.335.829	5.665.483	4.918.333	6.846.601	9.164.110	7.939.384	7.553.977	7.207.111	6.918.055	6.783.163	5.322.246
30	1.165.759	1.748.638	2.040.078	2.040.078	2.459.022	3.278.696	4.284.163	3.719.178	5.177.309	6.929.779	6.003.657	5.712.217	5.449.922	5.231.342	3.945.703
35		735.759	1.103.638	1.287.578	1.287.578	1.551.991	2.069.322	2.703.914	2.347.328	3.267.616	4.373.672	3.789.158	3.605.219	3.439.673	2.427.880
40			363.197	544.796	635.596	635.596	766.120	1.021.493	1.334.751	1.158.727	1.613.014	2.159.004	1.870.467	1.779.667	1.156.869
45				130.098	195.148	227.672	227.672	274.426	365.902	478.112	415.059	577.786	773.362	670.007	394.113
50					31.062	46.592	54.358	54.358	65.520	87.361	114.151	99.097	137.949	184.644	87.509
55						4.495	6.743	7.867	7.867	9.482	12.643	16.520	14.341	19.964	11.103
60							355	533	621	621	749	999	1.305	1.133	789
65								14	20	24	24	29	38	50	28
70									0	0	0	0	0	1	0
75										0	0	0	0	0	0
80											0	0	0	0	0
85												0	0	0	0
90													0	0	0
Summe	27.171.510	31.722.354	37.996.777	46.522.512	52.727.154	57.639.183	61.183.046	63.329.211	64.255.806	64.356.541	63.781.443	62.774.308	61.721.483	60.822.878	
Summe Abgänge	1.119.354	1.829.856	2.607.877	3.363.139	4.095.358	4.887.971	5.806.136	6.828.835	7.873.406	8.824.265	9.525.097	9.832.135	9.752.826	9.473.604	
% Abgänge an Zugängen	15,2%	28,7%	29,4%	28,3%	39,8%	49,9%	62,1%	76,1%	89,5%	98,9%	106,4%	111,4%	112,1%	110,5%	
% Zugänge an Bestand	27,1%	20,1%	23,4%	25,6%	19,5%	17,0%	15,3%	14,2%	13,7%	13,9%	14,0%	14,1%	14,1%	14,1%	
% Abgänge an Bestand	4,1%	5,8%	6,9%	7,2%	7,8%	8,5%	9,5%	10,8%	12,3%	13,7%	14,9%	15,7%	15,8%	15,6%	
Bestands- wachstum	29,8%	16,7%	19,8%	22,4%	13,3%	9,3%	6,1%	3,5%	1,5%	0,2%	-0,9%	-1,6%	-1,7%	-1,5%	

Zement; Weibull-Verteilung T=90, Alpha = 3; Substitutionsszenario

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049
0	7.138.300	6.017.400	8.435.450	8.200.000	7.400.000	7.150.000	6.950.000	6.825.000	6.800.000	6.925.000	6.970.000	6.895.000	6.780.000	6.605.000
5	7.949.137	7.137.076	6.016.368	8.434.004	8.198.594	7.398.731	7.148.774	6.948.808	6.823.830	6.798.834	6.923.813	6.968.805	6.893.818	6.778.838
10	9.225.187	7.939.601	7.128.515	6.009.151	8.423.887	8.188.759	7.389.856	7.140.199	6.940.473	6.815.644	6.790.679	6.915.507	6.960.446	6.885.548
15	8.053.802	9.195.181	7.913.777	7.105.329	5.989.606	8.396.487	8.162.125	7.365.820	7.116.975	6.917.898	6.793.476	6.768.591	6.893.014	6.937.806
20	5.904.868	8.002.868	9.137.029	7.863.729	7.060.393	5.951.726	8.343.386	8.110.506	7.319.237	7.071.965	6.874.148	6.750.512	6.725.785	6.849.421
25	4.070.366	5.843.428	7.919.598	9.041.958	7.781.906	6.986.929	5.889.799	8.256.573	8.026.116	7.243.080	6.998.381	6.802.622	6.680.273	6.655.803
30	2.272.336	4.007.347	5.752.958	7.796.983	8.901.966	7.661.423	6.878.755	5.798.610	8.128.741	7.901.852	7.130.939	6.890.029	6.697.301	6.576.846
35		2.223.388	3.921.025	5.629.033	7.629.029	8.710.209	7.496.389	6.730.579	5.673.702	7.953.639	7.731.638	6.977.332	6.741.611	6.553.034
40			2.159.883	3.809.032	5.468.255	7.411.127	8.461.426	7.282.275	6.538.339	5.511.649	7.726.466	7.510.805	6.778.044	6.549.056
45				2.080.994	3.669.907	5.268.529	7.140.437	8.152.374	7.016.292	6.299.528	5.310.337	7.444.258	7.236.475	6.530.477
50					1.986.507	3.503.277	5.029.313	6.816.228	7.782.218	6.697.719	6.013.500	5.069.223	7.106.254	6.907.905
55						1.876.901	3.309.982	4.751.819	6.440.141	7.352.832	6.328.171	5.681.703	4.789.527	6.714.165
60							1.753.387	3.092.161	4.439.114	6.016.331	6.868.961	5.911.730	5.307.805	4.474.341
65								1.617.903	2.853.230	4.096.105	5.551.451	6.338.198	5.454.932	4.897.672
70									1.473.054	2.597.784	3.729.386	5.054.437	5.770.748	4.966.559
75										1.321.995	2.331.386	3.346.943	4.536.112	5.178.966
80											1.168.258	2.060.265	2.957.721	4.008.600
85												1.015.544	1.790.948	2.571.090
90													867.487	1.529.845
Summe	44.613.997	50.366.290	58.384.603	65.970.212	72.510.051	78.504.098	83.953.627	88.888.855	93.371.461	97.521.856	101.240.988	103.385.961	104.309.865	104.070.037
Summe Abgänge	154.837	265.107	417.138	614.391	860.161	1.155.952	1.500.471	1.889.772	2.317.394	2.774.605	3.250.868	4.750.027	5.856.096	6.844.828
% Abgänge an Zugängen	2,2%	4,4%	4,9%	7,5%	11,6%	16,2%	21,6%	27,7%	34,1%	40,1%	46,6%	68,9%	86,4%	103,6%
% Zugänge an Bestand	16,0%	11,9%	14,4%	12,4%	10,2%	9,1%	8,3%	7,7%	7,3%	7,1%	6,9%	6,7%	6,5%	6,3%
% Abgänge an Bestand	0,3%	0,5%	0,7%	0,9%	1,2%	1,5%	1,8%	2,1%	2,5%	2,8%	3,2%	4,6%	5,6%	6,6%
Bestands- wachstum	18,6%	12,9%	15,9%	13,0%	9,9%	8,3%	6,9%	5,9%	5,0%	4,4%	3,8%	2,1%	0,9%	-0,2%

Anhang 3c: Szenario 3: Mengenbeschränkungen der Produktion von Gipsprodukten ab 2010 auf 5,3 Mio. t/a (Produktionsvolumen von 1991)

Prognose des Verbrauchs an Gipsprodukten 2000-2050 bei Beschränkung des Gipsverbrauchs auf 5,3 Mio. t pro Jahr ab 2010 (Stand von 1991)													
Produkt	Lebensdauer	Ausfallverhalt	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anhydritestrich	30	6	700.000	600.000	500.000	475.000	450.000	425.000	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000
Gipsestrich	30	6	300.000	263.033	226.065	218.033	210.000	205.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
Putzmörtel	35	4	2.100.000	1.803.550	1.507.100	1.503.550	1.500.000	1.450.000	1.400.000	1.400.000	1.400.000	1.400.000	1.400.000
Gipskleber	40	2	40.000	31.638	23.275	23.275	23.275	24.138	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
Ansetzbinder	40	2	135.000	87.620	40.240	40.240	40.240	40.120	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000
Vollgipsplatte	40	2	600.000	509.500	419.000	459.500	500.000	530.000	560.000	560.000	560.000	560.000	560.000
Vollgipsverbundplatte zur Wärmedämmung	40	2	200.000	123.250	46.500	23.250	0	0	0	0	0	0	0
Gipsfaserplatte	40	2	1.300.000	650.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gipskartonplatte	40	2	1.400.000	1.100.000	800.000	800.000	800.000	850.000	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000
Gipskartonverbundplatte Wärmedämmung	40	2	15.000	9.900	4.800	2.400	0	0	0	0	0	0	0
Modellformengips Keramikindustrie	5	10	100.000	96.000	92.000	96.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Modellformengips andere Industrie	1	10	100.000	96.000	92.000	96.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Medizinalgips	1	10	10.000	9.000	8.000	9.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Zement	90	3	1.500.000	1.525.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000	1.550.000
Summe			8.500.000	6.904.490	5.308.980	5.296.248	5.283.515	5.284.258	5.285.000	5.285.000	5.285.000	5.285.000	5.285.000

Modellformengips; 50 % Keramikind.: Weibull-Verteilung T=5, Alpha = 10; 50 % sonst. Ind. Weibull-Verteilung T=1, Alpha = 10; Szenario Mengenbeschränkung

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	900.000	911.000	982.000	1.000.000	984.000	944.000	936.000	976.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	816.650
5	156.349	165.546	167.569	180.629	183.940	180.997	173.639	172.168	179.525	183.940	183.940	183.940	183.940	183.940	148.439
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60							0	0	0	0	0	0	0	0	0
65								0	0	0	0	0	0	0	0
70									0	0	0	0	0	0	0
75										0	0	0	0	0	0
80											0	0	0	0	0
85												0	0	0	0
90													0	0	0
Summe	1.056.349	1.076.546	1.149.569	1.180.629	1.167.940	1.124.997	1.109.639	1.148.168	1.179.525	1.183.940	1.183.940	1.183.940	1.183.940	1.183.940	
Summe Abgänge	831.606	890.803	908.977	968.940	996.689	986.943	951.358	937.472	968.642	995.585	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	
% Abgänge an Zugängen	92,4%	97,8%	92,6%	96,9%	101,3%	104,5%	101,6%	96,1%	96,9%	99,6%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
% Zugänge an Bestand	85,2%	84,6%	85,4%	84,7%	84,3%	83,9%	84,4%	85,0%	84,8%	84,5%	84,5%	84,5%	84,5%	84,5%	
% Abgänge an Bestand	78,7%	82,7%	79,1%	82,1%	85,3%	87,7%	85,7%	81,6%	82,1%	84,1%	84,5%	84,5%	84,5%	84,5%	
Bestands- wachstum	6,9%	1,9%	6,8%	2,7%	-1,1%	-3,7%	-1,4%	3,5%	2,7%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	

Gipskleber und Ansetzbinder; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Szenario Mengenbeschränkung

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnitt tl. Bestand
0	217.650	227.620	374.317	931.044	763.515	484.803	317.575	317.575	319.060	322.773	325.000	325.000	325.000	325.000	298.547
5	167.364	214.276	224.091	368.514	916.610	751.678	477.286	312.651	312.651	314.113	317.768	319.961	319.961	319.961	292.547
10	159.700	159.700	204.463	213.829	351.638	874.635	717.256	455.430	298.334	298.334	299.729	303.217	305.309	305.309	277.697
15	32.581	147.699	147.699	189.098	197.760	325.212	808.905	663.353	421.204	275.914	275.914	277.204	280.430	282.365	255.326
20	13.629	29.205	132.396	132.396	169.506	177.271	291.518	725.098	594.626	377.565	247.328	247.328	248.484	251.375	227.358
25	0	11.841	25.374	115.028	115.028	147.269	154.015	253.276	629.976	516.620	328.034	214.882	214.882	215.887	196.141
30	0	0	9.971	21.367	96.863	96.863	124.013	129.694	213.279	530.493	435.038	276.232	180.949	180.949	163.979
35		0	0	8.138	17.439	79.057	79.057	101.217	105.853	174.074	432.976	355.067	225.454	147.686	132.771
40			0	0	6.438	13.795	62.540	62.540	80.069	83.737	137.704	342.512	280.881	178.349	104.047
45				0	0	4.936	10.577	47.951	47.951	61.391	64.203	105.581	262.613	215.359	74.597
50					0	0	3.668	7.860	35.634	35.634	45.622	47.712	78.461	195.157	44.975
55						0	0	2.642	5.662	25.666	25.666	32.860	34.365	56.513	20.375
60							0	0	1.844	3.952	17.918	17.918	22.940	23.991	11.070
65								0	0	1.248	2.674	12.124	12.124	15.522	6.242
70									0	0	818	1.754	7.951	7.951	3.079
75										0	0	520	1.115	5.054	1.338
80											0	0	321	687	252
85												0	0	191	64
90													0	0	0
95														0	0
Summe	590.924	790.341	1.118.311	1.979.414	2.634.797	2.955.520	3.046.412	3.079.286	3.066.144	3.021.514	2.956.392	2.879.872	2.801.241	2.727.117	
Summe Abgänge	14.522	28.204	46.347	69.941	108.132	164.079	226.683	284.700	332.203	367.403	390.122	401.520	403.632	399.124	
Alters- durchschnitt	5,4	7,3	8,0	6,7	8,0	10,5	13,5	16,1	18,3	20,1	21,5	22,4	22,9	23,1	
% Abgänge an Zugängen	6,7%	12,4%	12,4%	7,5%	14,2%	33,8%	71,4%	89,6%	104,1%	113,8%	120,0%	123,5%	124,2%	122,8%	
% Zugänge an Bestand	36,8%	28,8%	33,5%	47,0%	29,0%	16,4%	10,4%	10,3%	10,4%	10,7%	11,0%	11,3%	11,6%	11,9%	
% Abgänge an Bestand	2,5%	3,6%	4,1%	3,5%	4,1%	5,6%	7,4%	9,2%	10,8%	12,2%	13,2%	13,9%	14,4%	14,6%	
Bestands- wachstum	52,4%	33,7%	41,5%	77,0%	33,1%	12,2%	3,1%	1,1%	-0,4%	-1,5%	-2,2%	-2,6%	-2,7%	-2,6%	

Gipsfaserplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Szenario Mengenbeschränkung

Periode Alter	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	0	6.528.400	5.200.000	1.950.000	0	0	0	0	0	0	0	0	854.900
5	0	0	6.427.187	5.119.381	1.919.768	0	0	0	0	0	0	0	897.756
10	0	0	0	6.132.864	4.884.948	1.831.855	0	0	0	0	0	0	917.833
15	0	0	0	0	5.671.972	4.517.838	1.694.189	0	0	0	0	0	914.154
20	0	0	0	0	0	5.084.323	4.049.764	1.518.662	0	0	0	0	887.729
25		0	0	0	0	0	4.417.336	3.518.496	1.319.436	0	0	0	841.388
30			0	0	0	0	0	3.719.770	2.962.871	1.111.077	0	0	779.372
35				0	0	0	0	0	3.035.988	2.418.225	906.834	0	706.783
40					0	0	0	0	0	2.401.664	1.912.973	717.365	629.000
45						0	0	0	0	0	1.841.420	1.466.727	472.592
50							0	0	0	0	0	1.368.427	228.071
55								0	0	0	0	0	0
60									0	0	0	0	0
65										0	0	0	0
70											0	0	0
75												0	0
Summe	0	6.528.400	11.627.187	13.202.246	12.476.688	11.434.017	10.161.290	8.756.928	7.318.295	5.930.965	4.661.227	3.552.519	
Summe Abgänge	0	0	101.213	374.941	725.558	1.042.671	1.272.727	1.404.362	1.438.633	1.387.329	1.269.738	1.108.708	
Alters- durchschnitt		0,0	2,8	6,6	11,5	16,4	21,3	26,3	31,2	36,1	41,0	45,9	
% Abgänge an Zugängen		0,0%	1,9%	19,2%									
% Zugänge an Bestand		100,0%	44,7%	14,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
% Abgänge an Bestand		0,0%	0,9%	2,8%	5,8%	9,1%	12,5%	16,0%	19,7%	23,4%	27,2%	31,2%	
Bestands- wachstum			78,1%	13,5%	-5,5%	-8,4%	-11,1%	-13,8%	-16,4%	-19,0%	-21,4%	-23,8%	

Vollgipsplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Szenario Mengenbeschränkung

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnitt tl. Bestand
0	1.350.000	1.720.000	2.462.200	4.526.220	3.665.500	2.829.250	2.362.000	2.448.250	2.560.000	2.710.000	2.800.000	2.800.000	2.800.000	2.800.000	2.046.671
5	984.496	1.329.070	1.693.334	2.424.027	4.456.047	3.608.672	2.785.387	2.325.381	2.410.293	2.520.311	2.667.985	2.756.590	2.756.590	2.756.590	1.975.906
10	939.413	939.413	1.268.208	1.615.790	2.313.023	4.251.990	3.443.419	2.657.834	2.218.894	2.299.918	2.404.897	2.545.809	2.630.357	2.630.357	1.844.038
15	651.611	868.815	868.815	1.172.900	1.494.362	2.139.196	3.932.448	3.184.642	2.458.095	2.052.141	2.127.076	2.224.167	2.354.489	2.432.682	1.662.678
20	272.580	584.101	778.801	778.801	1.051.381	1.339.537	1.917.563	3.525.024	2.854.694	2.203.422	1.839.527	1.906.699	1.993.730	2.110.550	1.447.276
25	0	236.822	507.475	676.634	676.634	913.456	1.163.810	1.666.008	3.062.594	2.480.201	1.914.366	1.598.209	1.656.569	1.732.183	1.218.997
30	0	0	199.424	427.337	569.783	569.783	769.207	980.026	1.402.919	2.578.962	2.088.539	1.612.058	1.345.827	1.394.971	995.631
35		0	0	162.765	348.782	465.043	465.043	627.808	799.874	1.145.029	2.104.888	1.704.616	1.315.723	1.098.432	787.539
40			0	0	128.758	275.910	367.879	367.879	496.637	632.753	905.793	1.665.103	1.348.462	1.040.823	602.500
45				0	0	98.722	211.547	282.063	282.063	380.785	485.148	694.495	1.276.679	1.033.902	431.400
50					0	0	73.364	157.209	209.611	209.611	282.975	360.532	516.105	948.747	275.815
55						0	0	52.842	113.233	150.977	150.977	203.820	259.681	371.737	144.807
60							0	0	36.890	79.049	105.399	105.399	142.289	181.287	81.289
65								0	24.961	53.488	71.317	71.317	96.278	124.165	45.337
70									0	0	16.370	35.078	46.771	46.771	24.165
75										0	0	10.405	22.297	29.729	12.486
80											0	0	6.410	13.737	5.037
85												0	0	3.828	1.276
90													0	0	0
95														0	0
Summe	4.198.101	5.678.221	7.778.257	11.784.475	14.704.270	16.491.559	17.491.667	18.274.966	18.905.798	19.468.122	19.947.430	20.294.297	20.543.296	20.718.774	
Summe Abgänge	145.040	239.880	362.164	520.002	745.705	1.041.961	1.361.892	1.664.951	1.929.168	2.147.676	2.320.692	2.453.133	2.551.001	2.624.522	
Alters- durchschnitt	7,0	8,2	8,8	8,2	9,5	11,6	13,8	15,7	17,3	18,4	19,1	19,7	20,1	20,4	
% Abgänge an Zugängen	10,7%	13,9%	14,7%	11,5%	20,3%	36,8%	57,7%	68,0%	75,4%	79,3%	82,9%	87,6%	91,1%	93,7%	
% Zugänge an Bestand	32,2%	30,3%	31,7%	38,4%	24,9%	17,2%	13,5%	13,4%	13,5%	13,9%	14,0%	13,8%	13,6%	13,5%	
% Abgänge an Bestand	3,5%	4,2%	4,7%	4,4%	5,1%	6,3%	7,8%	9,1%	10,2%	11,0%	11,6%	12,1%	12,4%	12,7%	
Bestands- wachstum	40,3%	35,3%	37,0%	51,5%	24,8%	12,2%	6,1%	4,5%	3,5%	3,0%	2,5%	1,7%	1,2%	0,9%	

Gipskartonplatten; Weibull-Verteilung T=40, Alpha = 2; Szenario Mengenbeschränkung

Periode Alter	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnitt tl. Bestand
0	3.003.000	2.832.400	5.024.876	7.566.265	6.464.800	4.939.300	4.019.200	4.007.200	4.100.000	4.350.000	4.500.000	4.500.000	4.500.000	4.500.000	4.319.190
5	2.362.791	2.956.443	2.788.488	4.946.973	7.448.961	6.364.573	4.862.723	3.956.888	3.945.074	4.036.435	4.282.560	4.430.234	4.430.234	4.430.234	4.240.360
10	2.254.591	2.254.591	2.821.057	2.660.794	4.720.434	7.107.848	6.073.118	4.640.043	3.775.689	3.764.416	3.851.594	4.086.447	4.227.359	4.227.359	4.033.239
15		2.085.156	2.085.156	2.609.052	2.460.832	4.365.688	6.573.685	5.616.716	4.291.338	3.491.941	3.481.516	3.562.142	3.779.345	3.909.668	3.716.326
20			1.869.122	1.869.122	2.338.739	2.205.875	3.913.377	5.892.613	5.034.791	3.846.731	3.130.156	3.120.810	3.193.083	3.387.783	3.316.850
25				1.623.921	1.623.921	2.031.931	1.916.498	3.400.001	5.119.591	4.374.302	3.342.098	2.719.527	2.711.407	2.774.199	2.876.127
30					1.367.479	1.367.479	1.711.058	1.613.853	2.863.088	4.311.128	3.683.532	2.814.328	2.290.071	2.283.234	2.430.525
35						1.116.104	1.116.104	1.396.525	1.317.188	2.336.784	3.518.640	3.006.411	2.296.988	1.869.102	1.997.094
40							882.911	882.911	1.104.742	1.041.982	1.848.549	2.783.473	2.378.267	1.817.067	1.592.488
45								676.951	676.951	847.035	798.915	1.417.331	2.134.163	1.823.481	1.196.404
50									503.067	503.067	629.463	593.703	1.053.271	1.585.975	811.425
55										362.346	362.346	453.385	427.628	758.643	472.870
60											252.958	252.958	316.514	298.533	280.241
65												171.160	171.160	214.164	185.495
70													112.249	112.249	112.249
75														71.350	71.350
Summe	7.620.383	10.128.590	14.588.699	21.276.126	26.425.166	29.498.798	31.068.673	32.083.700	32.731.520	33.266.168	33.682.325	33.740.751	33.738.331	33.665.276	
Summe Abgänge	145.409	324.193	564.767	878.838	1.315.760	1.865.668	2.449.325	2.992.173	3.452.180	3.815.352	4.083.843	4.441.574	4.502.419	4.573.055	
Alters- durchschnitt	4,5	6,8	7,6	7,9	9,5	11,6	14,0	16,1	17,8	19,0	19,8	20,5	21,0	21,2	
% Abgänge an Zugängen	4,8%	11,4%	11,2%	11,6%	20,4%	37,8%	60,9%	74,7%	84,2%	87,7%	90,8%	98,7%	100,1%	101,6%	
% Zugänge an Bestand	39,4%	28,0%	34,4%	35,6%	24,5%	16,7%	12,9%	12,5%	12,5%	13,1%	13,4%	13,3%	13,3%	13,4%	
% Abgänge an Bestand	1,9%	3,2%	3,9%	4,1%	5,0%	6,3%	7,9%	9,3%	10,5%	11,5%	12,1%	13,2%	13,3%	13,6%	
Bestands- wachstum	60,0%	32,9%	44,0%	45,8%	24,2%	11,6%	5,3%	3,3%	2,0%	1,6%	1,3%	0,2%	0,0%	-0,2%	

Gips- und Anhydritestrich; Weibull-Verteilung T=30, Alpha = 6; Szenario Mengenbeschränkung

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnittl. Bestand
0	3.202.500	2.857.105	4.185.205	5.619.082	4.726.065	4.041.228	3.564.260	3.399.098	3.240.000	3.090.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.135.055
5	2.843.689	3.202.431	2.857.044	4.185.115	5.618.961	4.725.964	4.041.141	3.564.184	3.399.025	3.239.931	3.089.934	2.999.936	2.999.936	2.999.936	3.142.096
10	2.629.203	2.839.852	3.198.110	2.853.188	4.179.468	5.611.379	4.719.587	4.035.688	3.559.374	3.394.438	3.235.559	3.085.764	2.995.888	2.995.888	3.145.743
15	2.239.729	2.591.995	2.799.662	3.152.850	2.812.810	4.120.319	5.531.966	4.652.794	3.978.574	3.509.001	3.346.399	3.189.768	3.042.094	2.953.489	3.109.914
20	1.854.802	2.083.790	2.411.529	2.604.738	2.933.336	2.616.971	3.833.446	5.146.808	4.328.848	3.701.570	3.264.690	3.113.410	2.967.684	2.830.291	2.902.486
25	1.216.199	1.448.707	1.627.560	1.883.543	2.034.450	2.291.104	2.044.005	2.994.142	4.019.953	3.381.079	2.891.139	2.549.911	2.431.752	2.317.932	2.270.767
30	478.243	625.395	744.956	836.926	968.558	1.046.157	1.178.134	1.051.070	1.539.651	2.067.145	1.738.622	1.486.685	1.311.218	1.250.458	1.165.944
35		104.428	136.559	162.666	182.748	211.491	228.435	257.253	229.508	336.193	451.374	379.639	324.627	286.313	253.172
40			4.718	6.170	7.350	8.257	9.556	10.321	11.624	10.370	15.190	20.395	17.153	14.668	11.314
45				15	19	23	26	30	32	36	32	47	64	53	34
50					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60							0	0	0	0	0	0	0	0	0
65								0	0	0	0	0	0	0	0
70									0	0	0	0	0	0	0
75										0	0	0	0	0	0
80											0	0	0	0	0
85												0	0	0	0
90													0	0	0
95														0	0
Summe	14.464.366	15.753.703	17.965.343	21.304.293	23.463.764	24.672.892	25.150.555	25.111.388	24.306.588	22.729.762	21.032.940	19.825.555	19.090.415	18.649.028	
Summe Abgänge	967.279	1.567.768	1.973.565	2.280.132	2.566.594	2.832.100	3.086.598	3.438.264	4.044.799	4.666.826	4.696.822	4.207.385	3.735.140	3.441.387	
Alters- durchschnitt	10,8	11,7	11,4	10,7	11,0	11,8	12,8	13,8	14,6	14,8	14,5	14,0	13,7	13,5	
% Abgänge an Zugängen	30,2%	54,9%	47,2%	40,6%	54,3%	70,1%	86,6%	101,2%	124,8%	151,0%	156,6%	140,2%	124,5%	114,7%	
% Zugänge an Bestand	22,1%	18,1%	23,3%	26,4%	20,1%	16,4%	14,2%	13,5%	13,3%	13,6%	14,3%	15,1%	15,7%	16,1%	
% Abgänge an Bestand	6,7%	10,0%	11,0%	10,7%	10,9%	11,5%	12,3%	13,7%	16,6%	20,5%	22,3%	21,2%	19,6%	18,5%	
Bestands- wachstum	18,3%	8,9%	14,0%	18,6%	10,1%	5,2%	1,9%	-0,2%	-3,2%	-6,5%	-7,5%	-5,7%	-3,7%	-2,3%	

Gipsmörtel; Weibull-Verteilung T=35, Alpha = 4; Szenario Mengenbeschränkung

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049	Durchschnitt i. Bestand
0	7.350.000	6.380.700	8.882.300	11.888.874	9.907.100	8.424.850	7.528.400	7.510.650	7.400.000	7.150.000	7.000.000	7.000.000	7.000.000	7.000.000	6.613.331
5	5.622.658	7.346.939	6.378.043	8.878.601	11.883.924	9.902.975	8.421.342	7.525.265	7.507.523	7.396.919	7.147.023	6.997.085	6.997.085	6.997.085	6.590.235
10	4.190.730	5.587.640	7.301.183	6.338.321	8.823.306	11.809.911	9.841.300	8.368.894	7.478.398	7.460.766	7.350.851	7.102.512	6.953.508	6.953.508	6.526.729
15	3.383.894	4.078.800	5.438.401	7.106.177	6.169.032	8.587.645	11.494.482	9.578.449	8.145.370	7.278.659	7.261.497	7.154.518	6.912.811	6.767.787	6.327.974
20	3.146.028	3.146.028	3.792.087	5.056.117	6.606.659	5.735.389	7.983.990	10.686.495	8.905.147	7.572.804	6.767.016	6.751.062	6.651.602	6.426.886	5.857.602
25	2.312.442	2.697.849	2.697.849	3.251.871	4.335.829	5.665.483	4.918.333	6.846.601	9.164.110	7.636.531	6.493.992	5.802.996	5.789.314	5.704.023	4.990.590
30	1.165.759	1.748.638	2.040.078	2.040.078	2.459.022	3.278.696	4.284.163	3.719.178	5.177.309	6.929.779	5.774.644	4.910.671	4.388.149	4.377.803	3.735.283
35		735.759	1.103.638	1.287.578	1.287.578	1.551.991	2.069.322	2.703.914	2.347.328	3.267.616	4.373.672	3.644.618	3.099.329	2.769.544	2.326.299
40			363.197	544.796	635.596	635.596	766.120	1.021.493	1.334.751	1.158.727	1.613.014	2.159.004	1.799.117	1.529.942	1.130.113
45				130.098	195.148	227.672	227.672	274.426	365.902	478.112	415.059	577.786	773.362	644.449	391.790
50					31.062	46.592	54.358	54.358	65.520	87.361	114.151	99.097	137.949	184.644	87.509
55						4.495	6.743	7.867	7.867	9.482	12.643	16.520	14.341	19.964	11.103
60							355	533	621	621	749	999	1.305	1.133	789
65								14	20	24	24	29	38	50	28
70									0	0	0	0	0	1	0
75										0	0	0	0	0	0
80											0	0	0	0	0
85												0	0	0	0
90													0	0	0
95														0	0
Summe	27.171.510	31.722.354	37.996.777	46.522.512	52.334.254	55.871.296	57.596.579	58.298.137	57.899.868	56.427.400	54.324.337	52.216.898	50.517.911	49.376.818	
Summe Abgänge	1.119.354	1.829.856	2.607.877	3.363.139	4.095.358	4.887.808	5.803.118	6.809.092	7.798.269	8.622.467	9.103.063	9.107.440	8.698.987	8.141.093	
Alters- durchschnitt	10,2	11,4	11,7	11,4	12,1	13,3	14,6	15,7	16,5	17,0	17,2	17,0	16,6	16,3	
% Abgänge an Zugängen	15,2%	28,7%	29,4%	28,3%	41,3%	58,0%	77,1%	90,7%	105,4%	120,6%	130,0%	130,1%	124,3%	116,3%	
% Zugänge an Bestand	27,1%	20,1%	23,4%	25,6%	18,9%	15,1%	13,1%	12,9%	12,8%	12,7%	12,9%	13,4%	13,9%	14,2%	
% Abgänge an Bestand	4,1%	5,8%	6,9%	7,2%	7,8%	8,7%	10,1%	11,7%	13,5%	15,3%	16,8%	17,4%	17,2%	16,5%	
Bestands- wachstum	29,8%	16,7%	19,8%	22,4%	12,5%	6,8%	3,1%	1,2%	-0,7%	-2,5%	-3,7%	-3,9%	-3,3%	-2,3%	

Zement; Weibull-Verteilung T=90, Alpha = 3; Szenario Mengenbeschränkung

Periode Alter	1980-1984	1984-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034	2035-2039	2040-2044	2045-2049
0	7.138.300	6.017.400	8.435.450	8.200.000	7.550.000	7.675.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000	7.750.000
5	7.949.137	7.137.076	6.016.368	8.434.004	8.198.594	7.548.706	7.673.684	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671	7.748.671
10	9.225.187	7.939.601	7.128.515	6.009.151	8.423.887	8.188.759	7.539.650	7.664.479	7.739.376	7.739.376	7.739.376	7.739.376	7.739.376	7.739.376
15	8.053.802	9.195.181	7.913.777	7.105.329	5.989.606	8.396.487	8.162.125	7.515.127	7.639.550	7.714.203	7.714.203	7.714.203	7.714.203	7.714.203
20	5.904.868	8.002.868	9.137.029	7.863.729	7.060.393	5.951.726	8.343.386	8.110.506	7.467.600	7.591.235	7.665.417	7.665.417	7.665.417	7.665.417
25	4.070.366	5.843.428	7.919.598	9.041.958	7.781.906	6.986.929	5.889.799	8.256.573	8.026.116	7.389.899	7.512.249	7.585.658	7.585.658	7.585.658
30	2.272.336	4.007.347	5.752.958	7.796.983	8.901.966	7.661.423	6.878.755	5.798.610	8.128.741	7.901.852	7.275.485	7.395.940	7.468.213	7.468.213
35		2.223.388	3.921.025	5.629.033	7.629.029	8.710.209	7.496.389	6.730.579	5.673.702	7.953.639	7.731.638	7.118.764	7.236.624	7.307.341
40			2.159.883	3.809.032	5.468.255	7.411.127	8.461.426	7.282.275	6.538.339	5.511.649	7.726.466	7.510.805	6.915.436	7.029.930
45				2.080.994	3.669.907	5.268.529	7.140.437	8.152.374	7.016.292	6.299.528	5.310.337	7.444.258	7.236.475	6.662.852
50					1.986.507	3.503.277	5.029.313	6.816.228	7.782.218	6.697.719	6.013.500	5.069.223	7.106.254	6.907.905
55						1.876.901	3.309.982	4.751.819	6.440.141	7.352.832	6.328.171	5.681.703	4.789.527	6.714.165
60							1.753.387	3.092.161	4.439.114	6.016.331	6.868.961	5.911.730	5.307.805	4.474.341
65								1.617.903	2.853.230	4.096.105	5.551.451	6.338.198	5.454.932	4.897.672
70									1.473.054	2.597.784	3.729.386	5.054.437	5.770.748	4.966.559
75										1.321.995	2.331.386	3.346.943	4.536.112	5.178.966
80											1.168.258	2.060.265	2.957.721	4.008.600
85												1.015.544	1.790.948	2.571.090
90													867.487	1.529.845
95														727.420
Summe	44.613.997	50.366.290	58.384.603	65.970.212	72.660.051	79.179.073	85.428.332	91.287.305	96.716.144	101.682.820	106.164.954	109.135.593	110.983.174	111.819.869
Summe Abgänge	154.837	265.107	417.138	614.391	860.161	1.155.978	1.500.741	1.891.027	2.321.162	2.783.324	3.267.866	4.779.361	5.902.419	6.913.305
Alters- durchschnitt	12,1	15,0	17,1	19,2	21,6	23,8	26,0	28,0	30,0	31,8	33,5	35,5	37,5	39,5
% Abgänge an Zugängen	2,2%	4,4%	4,9%	7,5%	11,4%	15,1%	19,4%	24,4%	30,0%	35,9%	42,2%	61,7%	76,2%	89,2%
% Zugänge an Bestand	16,0%	11,9%	14,4%	12,4%	10,4%	9,7%	9,1%	8,5%	8,0%	7,6%	7,3%	7,1%	7,0%	6,9%
% Abgänge an Bestand	0,3%	0,5%	0,7%	0,9%	1,2%	1,5%	1,8%	2,1%	2,4%	2,7%	3,1%	4,4%	5,3%	6,2%
Bestands- wachstum	18,6%	12,9%	15,9%	13,0%	10,1%	9,0%	7,9%	6,9%	5,9%	5,1%	4,4%	2,8%	1,7%	0,8%

Anhang 4: Mathematische Formulierung des Warehouse-Location-Problems

Das Warehouse-Location-Problem (WLP) ist eine Notation aus der Optimierungsrechnung, das zur Transportplanung bei Nebenbedingungen eingesetzt wird. Im folgenden wird eine Notation von Püchert wiedergegeben, der das WLP-Problem erweitert hat zur Planung von Kreislaufwirtschaftssystemen, bei denen an verschiedenen Stellen Reststoffe anfallen, die anschließend von unterschiedlichen Verfahren bearbeitet und letztendlich zu Produkten mit Erlösen oder Entsorgungskosten werden.

Die Zielsetzung liegt darin, dass durch Festlegung von Standorten und zugehörigen Kapazitäten eine kostenminimale Gestaltung des Gesamtsystems erreicht wird, um alle Reststoffe zu verarbeiten. Die spezifische Kostenfunktion pro Einheit Reststoff nimmt mit zunehmender Anlagenkapazität ab (Größendegression), wobei unterstellt wird, dass die Kostenfunktion innerhalb von Kapazitätsbereichen stückweise linear ist. Die Gesamtkosten setzen sich aus insgesamt 4 Bestandteilen zusammen: Transportkosten vom Anfallort zur Anlage ($k_{qi} \cdot x_{qi}$), fixe Kosten der Anlage in Abhängigkeit des Standorts und der Kapazität ($f_{im} \cdot y_{im}$), variable Kosten des Aufbereitungsverfahrens in Abhängigkeit der Kapazität ($k_{im} \cdot x_{im}$) sowie Transportkosten der entstehenden Produkte zur Senke ($k_{is} \cdot x_{is}$). Als Nebenbedingungen gelten, dass alle anfallenden Reststoffe verarbeitet werden müssen (Nebenbedingung 2), der Massenfluss in der Anlage ausgeglichen ist (Nebenbedingung 5, unter Berücksichtigung eines Stoffumwandlungsfaktors etwa für energetische Stoffe) und nur soviel Menge von einem Produkt produziert wird, wie auch vom Markt aufgenommen werden kann (Nebenbedingung 6).

Zur Lösung derartiger gemischt-ganzzahliger Optimierungsaufgaben bieten sich heuristische und exakte Lösungsverfahren an. Als effizient hat sich für die meisten Problemstellungen das Branch-and-Bound-Verfahren herausgestellt, bei dem zunächst jeweils Teilmengen des relaxierten Problems (ohne Berücksichtigung der Ganzzahligkeit) gebildet werden, für die eine Lösung gesucht wird. Ist die Lösung des Teilproblems schlechter als die bisherige beste Lösung der Teilprobleme, braucht das Teilproblem nicht weiter betrachtet zu werden.

Die mathematische Formulierung hat die folgende Form⁵¹⁰:

$$\text{Minimiere} \quad \sum_{q \in Q} \sum_{i \in I} k_{qi} \cdot x_{qi} + \sum_{i \in I} \sum_{m=1}^{\bar{m}_i} (f_{im} \cdot y_{im} + k_{im} \cdot x_{im}) + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} k_{is} \cdot x_{is}$$

unter den Nebenbedingungen

$$(1) \quad \sum_{i \in I} x_{qi} - a_q = 0 \quad \forall q \in Q$$

$$(2) \quad -\sum_{q \in Q} x_{qi} + \sum_{m=1}^{\bar{m}_i} x_{im} = 0 \quad \forall i \in I$$

$$(3) \quad x_{im} - u_{im} \cdot y_{im} \geq 0 \quad \forall i \in I, m=1, \dots, \bar{m}_i$$

$$(4) \quad x_{im} - o_{im} \cdot y_{im} \leq 0 \quad \forall i \in I, m=1, \dots, \bar{m}_i$$

⁵¹⁰ vgl. z.B. Püchert (1995, S. 146 ff.)

$$(5) \quad -a_i \cdot \sum_{m=1}^{\overline{m}} x_{im} + \sum_{s \in S} x_{is} = 0 \quad \forall i \in I$$

$$(6) \quad \sum_{i \in I} x_{is} - b_s \leq 0 \quad \forall s \in S$$

$$(7) \quad \sum_{m=1}^{\overline{m}} y_{im} \leq 1 \quad \text{mit } y_{im} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I$$

$$(8) \quad x_{qi}, x_{is}, x_{im} \geq 0 \quad \forall q \in Q, i \in I, s \in S, m = 1, \dots, \overline{m}$$

Legende:

- Q Indexmenge der Redukt-Anfallorte q, mit bekanntem Reduktanfall a_q
- I Indexmenge der (potenziellen) Standorte i für Aufbereitungsanlagen
- S Indexmenge der Senken
- a_q Reduktmenge am Anfallort q
- $u_{i\mu}$ Mindestkapazität des Kapazitätsbereichs μ des Aufbereitungsverfahrens am Standort i
- $o_{i\mu}$ Maximalkapazität des Kapazitätsbereichs μ des Aufbereitungsverfahrens am Standort i
- $y_{i\mu}$ Binärvariable, die anzeigt, ob am Standort i ein Aufbereitungsverfahren des Kapazitätsbereichs μ errichtet wird
- b_s Maximalkapazität der Verwertungsoption s
- k_{qi} Entfernungsabhängige Transportkosten von q nach i
- k_{is} Entfernungsabhängige Transportkosten von i nach s zuzüglich Annahmekosten/-erlöse
- x_{qi} Transportmenge von q nach i
- x_{is} Transportmenge von i nach s
- $x_{i\mu}$ Durchsatz des Verwertungsverfahrens am Standort i im Kapazitätsbereich μ
- $f_{i\mu}$ Fixkosten pro Jahr des Aufbereitungsverfahrens am Standort i im Kapazitätsbereich μ
- $k_{i\mu}$ variable Kosten des Aufbereitungsverfahrens am Standort i im Kapazitätsbereich μ